



Scuola di Dottorato Università Iuav di Venezia

Dottorato in Architettura, Città e Design XXXVI ciclo, a.a. 2023/2024

Nuove tecnologie e informazione per l'architettura, la città e l'ambiente

**Studio dei fenomeni di umidità da risalita capillare nel contesto  
Veneziano**

Tutor: Fabio Peron

Co-tutor: Massimiliano Scarpa

PhD Student: Erika Guolo



## Abstract

*This research aims to present one of the main sources of damage in cultural heritage: the presence of humidity, particularly rising damp and its interaction with the building stock. This phenomenon, described by physical and electrical models, can cause a range of damage to the building, from the weakening of the structure to the loss of internal comfort. This is why it is essential to identify the vulnerabilities of the buildings and to implement a restoration plan to improve the healthiness of the interior spaces. Various technologies used to identify this problem are widespread on the market, quantitative but above all qualitative, suitable in the historical-cultural heritage. However, real diagnosis protocols are lacking and very often there are various difficulties for building operators to really recognize the problem.*

*Venice is one of the cities in the world particularly affected by moisture phenomena, increased by specific environmental conditions, i.e. the construction of buildings directly on water and in direct contact with tidal flooding events. In order to study the causes and consequences of the phenomenon, it is very important to also investigate the intrinsic parameters of the buildings themselves, starting with the knowledge of the historical materials (bricks, mortars, plasters) and using non-destructive monitoring to investigate the possible presence and quantity of moisture in the structure. This literature evaluation was supported by laboratory tests and dynamic simulations, comparing the hygrometric behavior of different materials and masonry technologies, and in some cases with in-depth analysis in case studies of the lagoon territory.*

*The laboratory tests involved building masonry mock-ups under controlled conditions and limiting surrounding variables as an "ideal model" to simulate the suction and evaporation processes occurring in wet structures and to analyze their physical properties. Finally, hygrothermal simulation in dynamic regime aims to evaluate the vulnerability and behavior of building walls, considering the amount of water that can be accumulated inside. A phenomenological model was then developed to describe moisture transport, rising damp kinetics and evaporation phenomena.*

\*\*\*

*Questa ricerca vuole presentare una delle principali fonti di danno nei beni culturali: la presenza di umidità, in particolare l'umidità di risalita capillare e la sua interazione con il patrimonio costruito. Questo fenomeno, descritto mediante modelli fisici ed elettrici, può causare una serie di danni all'edificio, dall'indebolimento della struttura alla perdita del comfort interno. Per tale motivo è fondamentale identificare quali siano le vulnerabilità dell'edificio stesso e realizzare un piano di restauro che consenta di migliorare la salubrità degli spazi interni. Sul mercato sono diffuse diverse tecnologie utilizzate per identificare questo problema, quantitative ma soprattutto qualitative, adatte nel patrimonio storico-culturale. Mancano però dei veri e propri protocolli di diagnosi e molto spesso sussistono varie difficoltà da parte degli operatori del settore edilizio nel riconoscere realmente il problema.*

*Venezia è una delle città del mondo particolarmente colpite dai fenomeni di umidità, incrementati da specifiche condizioni ambientali, ovvero dalla costruzione di edifici direttamente sull'acqua e a diretto contatto con eventi alluvionali di marea. Per studiare cause e conseguenze del fenomeno, è molto importante indagare anche i parametri intrinseci degli edifici stessi, partendo dalla conoscenza dei materiali storici*

*(mattoni, malte, intonaci) e utilizzando un monitoraggio non distruttivo per indagare l'eventuale presenza e quantità di umidità nella struttura. Questa valutazione della letteratura è stata supportata da test di laboratorio e simulazioni dinamiche, confrontando il comportamento igrometrico di diversi materiali e tecnologie murarie, e in alcuni casi mediante approfondimenti in casi studio del territorio lagunare.*

*I test di laboratorio hanno quindi previsto di realizzare delle murature mock-up in condizioni controllate e limitandone le variabili al contorno, come "modello ideale", per simulare i processi di suzione ed evaporazione che avvengono nelle strutture soggette ad umidità e individuarne le peculiarità fisiche. Infine, le simulazioni termo-igrometriche in regime dinamico, hanno avuto lo scopo di valutare la vulnerabilità e il comportamento nelle pareti degli edifici, tenendo in considerazione la quantità di acqua che si può accumulare in esse. È quindi stato sviluppato un modello fenomenologico che descrive il trasferimento di umidità, la cinetica della risalita capillare ed il fenomeno di evaporazione.*

# Indice

Introduzione .....	7
1. Umidità da risalita capillare.....	9
1.1 Tipologie di umidità.....	10
1.1.1 Umidità da infiltrazione o meteorica .....	10
1.1.2 Umidità da condensazione .....	10
1.1.3 Umidità da costruzione.....	12
1.1.4 Umidità da risalita capillare .....	12
1.2 Principi della risalita capillare .....	12
1.2.1 Igroscopicità.....	13
1.2.2 Capillarità.....	15
1.2.3 La risalita capillare nelle murature.....	20
1.2.4 Sali solubili.....	22
1.2.5 Tipologie di degrado .....	24
2. Diagnosi e monitoraggio .....	27
2.1 Prove dirette o distruttive.....	29
2.1.1 Metodo gravimetrico o ponderale .....	29
2.1.2 Metodo del carburo di calcio.....	30
2.2 Prove indirette o non distruttive .....	31
2.2.1 Metodo capacitivo.....	31
2.2.2 Metodo resistivo.....	32
2.2.3 Georadar.....	32
2.2.4 NMR .....	32
2.2.5 Termografia ad infrarossi .....	33
2.2.6 Ultrasuoni .....	34
2.2.7 DTS.....	35
3. Sistemi di trattamento.....	37
3.1 Riduzione della capacità di assorbimento della muratura (DPC – Damp-Proof Course) .....	39
3.1.1 Metodo di Koch.....	39
3.1.2 Barriera meccanica .....	39
3.1.3 Barriera chimica .....	40
3.2 Sistemi evaporativi .....	41
3.2.1 Sifoni di Knapen.....	41
3.2.2 Ventilazione meccanica con controllo periferico .....	41

3.2.3	Intonaco macro-poroso .....	42
3.3	Sistemi elettrofisici.....	42
3.3.1	Elettrosmosi attiva .....	42
3.3.2	Elettrosmosi passiva .....	43
3.3.3	Elettrosmosi-foresi .....	44
3.3.4	Tecnologia a neutralizzazione di carica (CNT).....	44
3.4	Sistemi di “allontanamento” dell’acqua dalla parete .....	45
3.4.1	Intercapedine alla base della muratura.....	45
3.4.2	Contropareti.....	45
3.4.3	Drenaggio.....	45
4.	I materiali delle costruzioni storiche Veneziane .....	47
4.1	I materiali del costruito veneziano .....	48
4.1.1	Mattone .....	48
4.1.2	Malta .....	51
4.1.3	Intonaco.....	52
4.1.4	Pietra.....	54
4.2	Il degrado dei materiali in ambiente veneziano .....	55
4.3	I materiali nei trattati storici.....	56
4.4	Le caratteristiche dei materiali veneziani .....	58
5.	Gli edifici Veneziani e la risalita capillare.....	65
5.1	Gli edifici Veneziani e il contesto lagunare .....	66
5.2	La risalita capillare a Venezia .....	68
5.3	Sistemi storici di controllo della risalita capillare .....	72
6.	Caratterizzazione materiali da costruzione Veneziani.....	75
6.1	Mattone industriale da restauro .....	76
6.1.1	Dimensioni lineari.....	76
6.1.2	Massa fisiologica .....	77
6.1.3	Densità e porosità.....	77
6.1.4	Assorbimento d’acqua capillare.....	79
6.1.5	Assorbimento d’acqua per immersione totale .....	82
6.1.6	Conduttività termica.....	83
6.1.7	Resistenza a compressione .....	84
6.2	Mattoni di recupero.....	84
6.3	Malta di calce premiscelata .....	85

6.3.1	Assorbimento d'acqua capillare.....	86
6.3.2	Resistenza a compressione e flessione .....	86
6.4	Malta di calce-sabbia .....	87
6.5	Intonaco.....	87
7.	Sperimentazione in laboratorio su mock-up in muratura .....	89
7.1	Stato dell'arte sperimentazioni umidità di risalita capillare.....	90
7.2	Materiali costruttivi .....	91
7.3	Costruzione modelli di muratura.....	92
7.3.1	Trattamenti di "stimolazione" della risalita capillare.....	93
7.3.2	Rivestimento con intonaco.....	95
7.4	Monitoraggio della risalita capillare .....	96
7.4.1	Monitoraggio in continuo .....	97
7.4.2	Monitoraggio discontinuo .....	101
7.5	Sistemi di trattamento .....	119
7.5.1	Sistema di tipo "passivo" .....	119
7.5.2	Monitoraggio efficacia del sistema di trattamento.....	121
7.6	Risultati .....	125
8	Sperimentazione su casi studio in campo .....	127
8.1	Teson Grande - Lazzaretto Nuovo .....	128
8.1.1	Informazioni generali .....	128
8.1.2	Monitoraggio .....	129
8.1.3	Analisi dei risultati.....	130
8.2	Chiesa S. Michele in Isola – Isola di S. Michele, Venezia .....	136
8.2.1	Informazioni generali .....	136
8.2.2	Monitoraggio .....	137
8.2.3	Analisi dei risultati.....	137
8.3	Abbazia di S. Giorgio Maggiore – Isola di S. Giorgio Maggiore, Venezia.....	140
8.3.1	Informazioni generali .....	140
8.3.2	Monitoraggio .....	141
8.3.3	Analisi dei risultati.....	143
8.4	Discussione .....	146
9	Simulazione dinamica igrometrica .....	147
9.1	Modelli numerici del trasporto di umidità .....	148
9.2	Software di simulazione dinamica igrometrica WUFI 2D .....	149

9.2.1	Metodo .....	151
9.3	Risultati .....	154
	Conclusioni .....	163
	Bibliografia .....	165
	Appendice A .....	177
	Appendice B .....	191
	Appendice C .....	207

## Introduzione

Uno dei principali problemi riscontrati e studiati negli edifici è la presenza di umidità nella struttura che li compone, in quanto può compromettere la durabilità del patrimonio edilizio, architettonico ed artistico, causando una serie di patologie ed implicazioni economiche tali da ricevere grande attenzione nella ricerca scientifica. Le origini possono essere di diverso tipo, dalla elevata presenza di acqua nei materiali da costruzione, alla formazione di condensa nella tecnologia costruttiva dell'elemento indagato. Ne possono derivare danni sia sul comportamento meccanico della struttura, come corrosioni e dissesti, che sul comportamento termico, con crescita di muffe, aumento delle dispersioni di calore ed una riduzione del grado di benessere negli ambienti interni, con conseguente aumento dei rischi sia per la preservazione delle opere, che per la salute umana (allergie, infezioni del tratto respiratorio o asma).

Questa ricerca si occupa di analizzare l'umidità da risalita capillare, la sua interazione e manifestazione con il patrimonio costruito e le teorie che la descrivono, dal punto di vista fisico e per quanto riguarda gli aspetti elettrici. L'individuazione delle aree interessate dal fenomeno avviene con metodologie differenti, sia invasive/distruttive con campionamenti di materiale in loco, che non invasive/non distruttive, il cui utilizzo è adatto anche nel patrimonio storico-culturale. Tali metodologie, opportunamente scelte in base al luogo da indagare, permettono di valutare sia qualitativamente che quantitativamente il contenuto acqueo all'interno della struttura e individuare quali siano le cause strutturali o transitorie di instabilità della struttura.

Una delle città simbolo del fenomeno della risalita capillare è Venezia, grazie alle sue costruzioni che poggiano su terreni permeabili e costantemente lambite dal movimento della marea, più o meno accentuato a seconda delle condizioni meteorologiche naturali o attività di tipo antropico. La costruzione dei suoi edifici nei secoli scorsi ha dovuto tenere in considerazione i particolari aspetti climatici e i modi di conservazione del patrimonio architettonico. Gli antichi mastri costruttori hanno posto particolari attenzioni ai materiali utilizzati nella posa in opera delle murature: mattone, malta, intonaco e pietra. Elementi studiati e approfonditi anche negli ultimi decenni per l'identificazione delle loro peculiarità fisico-chimico-mineralogiche.

La conoscenza del manufatto in sé, i materiali che lo compongono, le caratteristiche chimico-fisiche, la tecnologia costruttiva e gli interventi eseguiti negli anni, sono fattori di fondamentale importanza per poter individuare e pianificare appropriati interventi di diagnosi, manutenzione e conservazione plausibili alla presenza di edifici prestigiosi. Si possono infatti presentare limiti di indagine "in situ", in quanto l'esecuzione di prove di carattere invasivo/distruttivo può arrecare gravi danni strutturali ed estetici, con perdite di valore storico-culturale. Sarà perciò necessaria una corretta lettura e interpretazione dei dati volta alla valutazione dei metodi di monitoraggio più affidabili in modo da identificare le aree ammalorate e definire la causa che provoca il degrado, che sia di tipo transitorio o permanente, limitando l'influenza delle variabili al contorno in situ, costruttive (intrinseche) e atmosferiche (estrinseche).

Individuare l'umidità di risalita capillare è ben più complesso di quanto si possa immaginare. Soprattutto in un caso reale, dove parametri intrinseci ed estrinseci non sono di facile

individuazione, dovuto alla spesso ricorrente perdita di memoria di un edificio con circa quattro/cinque secoli di storia, in seguito al cambio di proprietà o gestione dell'immobile.

L'obiettivo è stato quello di simulare il fenomeno di risalita capillare, analizzandolo in condizioni controllate e limitandone le variabili al contorno. Sono quindi stati realizzati dei campioni di muratura a scala reale in laboratorio come "modello ideale", per simulare i processi di suzione ed evaporazione che avvengono nelle strutture soggette ad umidità e individuarne le peculiarità fisiche. I materiali costruttivi scelti rispecchiano le componenti principali delle murature tradizionali veneziane, con origine e composizioni differenti. In tale sperimentazione, la diagnosi mediante differenti metodologie di monitoraggio ha un ruolo chiave: la messa a punto di alcune tecniche non invasive e la stesura di un protocollo di indagine in laboratorio, permetterà di eseguire direttamente sul campo, in futuro, analisi mirate e adatte alla conservazione del patrimonio storico.

In seguito all'individuazione dei degradi mediante varie tecniche di diagnosi, si è ritenuto indispensabile valutare i metodi più utilizzati per ovviare alla risalita capillare. Negli anni sono molti gli studi che hanno affrontato il tema, utilizzando tecniche di vario genere, dalla ricerca della limitazione della risalita mantenendo l'acqua nel terreno, all'aumento dell'evaporazione nei muri. Sono state quindi identificate quattro macrocategorie di sistemi di trattamento: riduzione della capacità di assorbimento della muratura, aumento della capacità di evaporazione della muratura, allontanamento fisico dell'acqua e sistemi elettrofisici. I più diffusi negli ultimi decenni, perché poco invasivi e facilmente applicabili anche nel patrimonio storico-culturale, sono i sistemi elettromagnetici. Alcuni di questi sono stati approfonditi e analizzati sia con test sperimentali in laboratorio, valutandone l'efficacia del risultato utilizzando i modelli di muratura a scala reale precedentemente descritti, sia in alcuni casi reali nel territorio lagunare.

Le sperimentazioni sono state affiancate da simulazioni di tipo termo-igrometrico in regime dinamico, per valutare la vulnerabilità e il comportamento nelle pareti degli edifici, tenendo in considerazione la quantità di acqua che si può accumulare in esse se sottoposte a risalita capillare. È quindi stato sviluppato un modello fenomenologico che descrive il trasferimento di umidità, la cinetica della risalita capillare ed il fenomeno di evaporazione. La messa a punto della simulazione è avvenuta mediante confronto con i test a scala reale in laboratorio, in modo da poter fare delle previsioni a medio-lungo termine sul comportamento e sulla vulnerabilità dell'oggetto indagato, con una prospettiva futura di proporre delle metodologie di diagnosi e conservazione del patrimonio edilizio come eredità storico-culturale, mediante una pianificazione sostenibile di mantenimento e restauro di beni architettonici, dal punto di vista dell'efficacia e compatibilità di materiali e tecnologie.

## **1. Umidità da risalita capillare**

*La durabilità del patrimonio costruito e il comfort interno possono essere compromessi dalla presenza di umidità nella struttura. Tale fenomeno dev'essere opportunamente indagato per determinarne la causa all'origine e pianificare una strategia di diagnosi, prevenzione e manutenzione.*

*In questo capitolo, partendo da una prima analisi dei vari modi in cui l'umidità può interagire con il patrimonio costruito, si vuole presentare sinteticamente il fenomeno della risalita capillare, nelle sue manifestazioni e le teorie che lo descrivono, in particolare dal punto di vista fisico e per quanto riguarda gli aspetti elettrici. Tale manifestazione è particolarmente studiata a proposito dei degradi che ne derivano sugli edifici, con problemi sia alla struttura portante (dissesti meccanici), riduzione dell'efficienza energetica e limitazione del comfort termico. L'applicazione degli studi teorici alla struttura reale comporta l'analisi di ulteriori parametri intrinseci (materiale, tecnologia costruttiva) ed estrinseci (clima, orientamento) che influenzano notevolmente la risalita, comportando fenomeni più o meno accentuati.*

## 1.1 Tipologie di umidità

Le disfunzioni associate all'umidità nelle costruzioni storiche possono manifestarsi in seguito ad una serie di eventi, associati tra loro o indipendenti uno dall'altro [1](Tabella 1).

Tabella 1. Tipologie di umidità.

Tipo di umidità	Manifestazione	Modalità di intervento
Infiltrazione o meteorica	Macchie e aloni su soffitto/muri perimetrali.	Sistemazione e impermeabilizzazione copertura, canali di gronda e terrazzi.
Condensa superficiale	Macchie e aloni nei punti freddi dell'edificio (ponti termici).	Aerazione locali, sostituzione serramenti, isolamento pareti.
Risalita capillare	Macchie e muffa su muri perimetrali a contatto con il terreno, efflorescenze saline, distacco intonaco.	Aerazione, isolamento pareti, sostituzione intonaci, barriera chimica/meccanica, sistemi elettromagnetici.
Perdite/rotture	Macchie e aloni su soffitto/muri, rigonfiamento intonaco e pavimenti (se lignei).	Intervento diretto su rottura.

### 1.1.1 Umidità da infiltrazione o meteorica

Si tratta dell'umidità dovuta alla penetrazione diretta dell'acqua nelle murature, causata da precipitazioni atmosferiche battenti (degrado degli strati di protezione che favoriscono l'accesso della pioggia battente in modo occasionale, es. impermeabilizzazioni) o per infiltrazione accidentale (difetti tecnologico-costruttivi o di funzionamento delle reti impiantistiche permanenti, principalmente nelle coperture, nei terrazzi e nei canali di gronda)[2]. Questo tipo di umidità, che influenza le prestazioni igrometriche e di durabilità delle facciate degli edifici, si può manifestare con macchie sia in zone limitate della costruzione, sia in modo diffuso sulle superfici esterne.

Il risanamento consiste nell'eliminazione della causa che ha determinato la penetrazione di acqua con la riparazione del danno e la successiva evaporazione naturale, favorita grazie all'utilizzo di prodotti idrorepellenti, impermeabilizzanti e traspiranti.

### 1.1.2 Umidità da condensazione

È l'umidità generata da un cambiamento di stato dell'acqua contenuta nell'ambiente (vapore-liquido), dovuto a condizioni termiche sfavorevoli, come umidità relativa elevata ( $RH^1 > 65\%$ ) e scarso isolamento termico tra ambiente esterno ed interno. Si possono verificare fenomeni di condensa superficiale, con manifestazioni su pareti murarie fredde caratterizzate da temperature inferiori o uguali alla temperatura di rugiada, quando vengono a contatto con aria calda e umida, o interstiziale, negli strati interni delle pareti. Questo tipo di umidità si presenta in modo discontinuo nel tempo (variazioni stagionali), sotto forma di goccioline in corrispondenza di superfici impermeabili all'acqua e sotto forma di macchie scure in corrispondenza di superfici

<sup>1</sup> Umidità relativa RH [%]: rapporto tra pressione parziale di vapore e pressione di saturazione.

porose [2]. Le cause che alimentano il problema sono l'inadeguato isolamento dei ponti termici, errata posa in opera degli isolanti, errata stima della conducibilità dei materiali da costruzione e dei relativi spessori, mancato utilizzo dei sistemi di controllo di RH ed errore nella gestione degli impianti di riscaldamento.

Gli interventi utili all'eliminazione di questa patologia consistono nel garantire il corretto ricambio d'aria [3], condizionamento e deumidificazione degli ambienti, mediante la progettazione di un isolamento termico proporzionato alle condizioni climatiche esterne.

Tabella 2. Quantità limite dell'acqua condensata accettabile alla fine del periodo di condensazione.

<b>Materiale</b>	<b>Densità <math>\rho</math> [kg/m<sup>3</sup>]</b>	<b>Massa d'acqua condensata accettabile <math>m_{lim}</math> [g/m<sup>2</sup>]</b>
Laterizi	600-2000	500
Calcestruzzi	400-2400	500
Intonaci malte	600-2400	500

Mediante lo studio in fase progettuale, è possibile determinare temperature e pressioni di vapore nella struttura, per comprendere la probabilità di forma di condensazione nei vari strati che compongono la muratura, ed evitare i danni che derivano dalla presenza di umidità di condensazione interstiziale, come il trasporto di Sali e la formazione di muffe. La normativa UNI EN ISO 13788 [4] contiene le procedure di calcolo analitiche semplificate per la valutazione di formazione di condensa superficiale e interstiziale dovuta alla diffusione del vapore in regime stazionario (metodo di Glaser), nonché la procedura per la determinazione della temperatura superficiale interna minima di chiusura, al di sotto del quale si ha possibile formazione di muffa. Sulle superfici di separazione dei diversi materiali si determinano le pressioni parziali  $Pp$  e le pressioni di saturazione  $Ps$ : si avrà condensazione quando  $Pp > Ps$ .

Per valutare la quantità di acqua che condensa, in regime stazionario:

$$g_c = g_{vi} - g_{vu} = \frac{(p_{vi} - p_{ci})}{R_i} - \frac{(p_{ce} - p_{ve})}{R_u}, \quad (1)$$

Dove:

$g_c$  è la quantità di acqua che condensa all'interno della zona nell'unità di tempo, per unità di superficie [kg/(s·m<sup>2</sup>)],  $g_{vi}$  è la portata specifica di massa del vapore entrante nella zona [kg/(s·m<sup>2</sup>)],  $g_{vu}$  è la portata specifica di massa del vapore uscente dalla zona [kg/(s·m<sup>2</sup>)],  $p_{vi} - p_{ci}$  è la differenza di pressione parziale del vapore tra la faccia interna e il punto di inizio della zona di condensazione,  $p_{ce} - p_{ve}$  è la differenza di pressione parziale del vapore tra il punto finale della zona di condensazione e la faccia esterna.

La normativa per la verifica termoigrometrica nelle pareti edili in regime stazionario, considera le temperature medie mensili esterne per la valutazione delle strutture pesanti; per le strutture leggere considera la media negli anni delle temperature dei giorni più freddi. Tale metodo trascura però la possibilità di accumulo di umidità igroscopica, le proprietà dei materiali (capacità di assorbimento correlata al coefficiente di resistenza al passaggio di vapore), il trasporto capillare di acqua, lo scambio di calore latente ed il clima esterno.

I limiti del metodo semplificato di Glaser sono stati superati con l'introduzione della UNI EN 15026 [5], che permette l'analisi del fenomeno di condensa in regime variabile mediante simulazioni dinamiche, valutando la corretta applicazione delle membrane impermeabilizzanti, i tempi di asciugatura dei materiali, l'irraggiamento e la condensa interstiziale nei singoli strati.

### 1.1.3 Umidità da costruzione

Si tratta in questo caso dell'umidità residua derivante dall'acqua utilizzata nella preparazione dei materiali edili, la cui quantità è in percentuale variabile tra il 20-25%, o igroscopicità degli stessi nella fase di consolidamento. Tale fenomeno si verifica poco dopo l'ultimazione della costruzione e si manifesta sotto forma di macchie irregolari che con il passare del tempo tendono a diminuire [2].

Le cause possono dipendere da fattori costruttivi (modalità di posa in opera di intonaco/rivestimenti o eccessiva percentuale di acqua nell'impasto) e/o ambientali (premature utilizzo degli immobili che non consente un'aerazione sufficiente a garantire lo smaltimento dell'umidità).

Gli interventi da eseguire per l'eliminazione dell'acqua in eccesso consistono nel creare le condizioni favorevoli all'evaporazione naturale, ovvero condizionamento meccanico con cicli di riscaldamento e/o ventilazione forzata. L'evaporazione è tanto più facilitata quando le pareti sono esposte al sole e all'aria, ed a parità di queste condizioni l'evaporazione dipende dal tipo di muratura, spessore e dal tipo di rivestimento. Il tempo di evaporazione è funzione del coefficiente di prosciugamento:

$$t = p s^2, \quad (2)$$

Dove:

$t$  è il tempo di prosciugamento [giorni],  $p$  è il coefficiente di prosciugamento,  $s$  è lo spessore della muratura [cm].

### 1.1.4 Umidità da risalita capillare

L'umidità da risalita deriva dall'acqua ascendente dal terreno derivante da falda freatica, da acque di scorrimento sotterranee o da acque disperse nel terreno per precipitazioni atmosferiche. L'acqua risale la struttura capillare dei materiali da costruzione fino ad un'altezza massima, poi spinta da differenza di temperatura e pressione con l'ambiente esterno, migra verso la superficie di evaporazione. Il fenomeno si manifesta su tutti quegli edifici non opportunamente impermeabilizzati alla base, con la formazione di un fronte umido al basamento della muratura, caratterizzato da una distribuzione del contenuto che decresce in altezza, con successivo sgretolamento delle tinteggiature e distacchi degli intonaci [2].

## 1.2 Principi della risalita capillare

La molecola di acqua  $H_2O$  è costituita da un atomo di ossigeno a cui sono legati due atomi di idrogeno, dando origine a una struttura tetraedrica. La struttura si presenta quindi come un dipolo elettrico con cariche distribuite in modo sbilanciato: un eccesso di carica negativa verso

l'ossigeno  $\delta^-$ , e positiva verso l'idrogeno  $\delta^+$ . Questa molecola presenta un diametro di circa 0.33 nm [6].

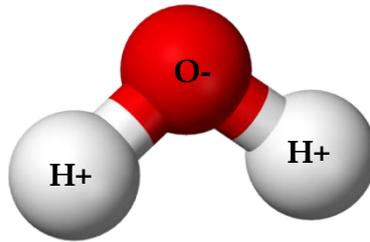


Figura 1. Struttura molecolare dell'acqua.

Il contatto tra terreni umidi o strati d'acqua sotterranei (falde freatiche) e materiali porosi determina il fenomeno di risalita capillare all'interno delle murature. L'interazione tra le molecole di un liquido e di un solido, con una predominanza delle forze di adesione rispetto a quelle di coesione, permette alle molecole d'acqua di risalire ed occupare progressivamente il volume dei vuoti, fungendo da vettore per i contenuti salini disciolti in soluzione. I Sali si depositano allo stato solido all'interno dei pori, con una conseguente saturazione dovuta al continuo deposito, determinando l'insorgere di stati di sollecitazione che producono rigonfiamenti, distacchi e fenomeni di degrado superficiale.

Nei materiali porosi, i meccanismi principali del trasporto dell'umidità sono la diffusione del vapore, la diffusione superficiale (trasporto liquido) e la conduzione capillare, approfondita in seguito.

### 1.2.1 Igroscopicità

L'igroscopicità è la capacità di un materiale di assorbire e rilasciare acqua sotto forma di vapore acqueo, al variare dell'umidità relativa presente nell'aria, fino a raggiungere uno stato di equilibrio. Tale caratteristica è correlata alla struttura microporosa del materiale (capacità e velocità del materiale di assorbire o rilasciare acqua), alla composizione chimica dello stesso, al contenuto di umidità in equilibrio (EMC – Equilibrium Moisture Content<sup>2</sup>) e alla temperatura dell'aria (Tabella 3) [7].

Secondo Hansen (1986 [8]) il massimo contenuto di umidità igroscopica in un mattone rosso è pari all'1% del suo peso, mentre il massimo contenuto d'acqua è intorno al 20-30% del suo peso. La relazione tra il contenuto di umidità nell'aria (ad una data temperatura) e il contenuto di umidità nel materiale, da origine alle isoterme di adsorbimento: si ottengono quando il solido viene in contatto con un'umidità relativa dell'aria crescente. Il fenomeno dell'adsorbimento è descritto come la tendenza di un solido in contatto con vapore acqueo di "catturare" e localizzare su di esso le molecole d'acqua. L'adsorbimento dei liquidi su una superficie solida dipende dalla capacità di questa (sorbente) di trattenere un film liquido molto sottile (sorbato); si verifica nel mezzo poroso insaturo, ossia ove i pori non sono completamente saturi d'acqua.

---

<sup>2</sup> Contenuto di umidità all'interno di un materiale, in condizioni stazionarie di temperatura e umidità relativa dell'aria.

Tabella 3. Valutazione igroscopicità dei materiali utilizzati nelle murature [7].

<b>Materiale</b>	<b>Densità [kg/m<sup>3</sup>]</b>	<b>EMC RH50% (20°C)</b>	<b>EMC RH85% (20°C)</b>	<b>Igroscopicità RH50-80% (20°C)</b>	<b>Velocità risalita igroscopica</b>	<b>Capillarità w [kg/m<sup>2</sup>h<sup>0.5</sup>]</b>
Mattone di argilla, cotto	1700	0.1	0.2	0.1%	Medio	25.1
Intonaco di calce	1600	1.25	3	1.75	Lento/medio	1
Intonaco di gesso	850	0.4	1	0.6	Medio	5

Nella fase di adsorbimento, grazie alle forze elettrostatiche di Van der Waals (1873), un materiale poroso asciutto, tratterrà molto facilmente le molecole di vapore acqueo negli interstizi porosi. La quantità massima di umidità adsorbita da un corpo solido dipende dalla temperatura, dalla pressione parziale di vapore e dalla superficie dell'area interessata; inoltre, tale fenomeno è variabile per ogni materiale (Figura 2) perché dipendente dalla propria capacità igroscopica e dalla porosità. Si parla di isoterma di desorbimento quando un materiale poroso, saturo di acqua, rilascia vapore acqueo nell'aria a differenti valori di umidità relativa (diminuzione di umidità nell'aria)[9]. Per alcuni materiali esiste un'isteresi tra adsorbimento e desorbimento, che si verifica quando le due isoterme non hanno lo stesso andamento.

$$\varphi_{sorption} = \exp\left(-\frac{\sigma \cdot v}{(r-h_s)R \cdot T}\right), \quad (3)$$

$$\varphi_{desorption} = \exp\left(-\frac{2 \cdot \sigma \cdot v}{(r-h_d)R \cdot T}\right), \quad (4)$$

Dove:

$\varphi$  è l'umidità relativa [-],  $\sigma$  è la tensione superficiale dell'acqua [N/m],  $v$  è il volume molare dell'acqua [m<sup>3</sup>],  $r$  è il raggio di curvatura dell'interfaccia solido-liquido [m],  $h$  è lo spessore del film d'acqua [m],  $R$  è la costante dei gas per il vapore [J/kgK],  $T$  è la temperatura termodinamica [K].

Risulta che la relazione tra assorbimento e desorbimento ad una data umidità relativa è [10]:

$$\varphi_{desorption} = \varphi_{sorption}^2 \quad (5)$$

Da qui, è possibile determinare il comportamento di assorbimento dell'umidità all'interno di un materiale. Esistono tre differenti regimi, come in Figura 3 [11]:

- I. regime igroscopico o di assorbimento (A-C), in cui il vapore d'acqua è assorbito all'interno dei pori all'aumentare dell'umidità relativa (RH < 60%);
- II. regime capillare (D) in cui si ha una fase di stoccaggio dell'umidità in forma liquida, con un contenuto di umidità relativa superiore al contenuto critico (RH ~ 80%), e una cessazione dei fenomeni igroscopici di adsorbimento;
- III. regime di saturazione (E) in cui l'umidità relativa è costantemente al 100% e il materiale non è più in grado di assorbire ulteriore acqua perché il volume interno dei pori è completamente riempito di liquido (saturo).

Il primo strato delle molecole d'acqua aderirà quindi alla superficie con il polo positivo, rivolgendo il polo negativo all'esterno, perché intervengono in questo alcuni ossidi metallici che interagiscono con l'acqua (ferro  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , alluminio  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , rame  $\text{CuO}$ ). Questo darà origine ad una superficie caricata negativamente in grado di attrarre nuove molecole d'acqua libere con polo positivo (atomo di idrogeno) e così via, dando origine a molti strati di molecole d'acqua sovrapposti.

### 1.2.2 Capillarità

Il fenomeno fisico della capillarità descrive la capacità di un liquido di muoversi all'interno di un tubo capillare, ossia l'insieme delle interazioni che avvengono fra le molecole di un liquido e un solido, in cui si manifestano forze di coesione, adesione e tensione superficiale. Le molecole del liquido sono caratterizzate da forze di coesione che le legano tra di loro, per mezzo delle quali possono muoversi senza disperdersi. In prossimità della superficie libera (interfaccia liquido-vapore), le molecole sono soggette alle forze esercitate dalle molecole sottostanti o laterali che determinano un'attrazione verso l'interno del liquido. I liquidi assumono quindi la geometria di una sfera, detta tensione superficiale  $\mathcal{T}$ . All'interno di un tubo, alle forze coesive si oppongono le forze di adesione esercitate dalle pareti del tubo sulla superficie laterale del liquido; tali forze si formano tra le molecole di acqua, gli atomi di ossigeno e i gruppi ossidrilici sulle superfici dei capillari, comportamento che modifica il pelo libero dell'acqua assumendo un andamento curvilineo detto menisco. Se le forze di coesione prevalgono su quelle di adesione, la curvatura del menisco sarà convessa (depressione capillare, il liquido è sottoposto ad una pressione verso il basso); viceversa, se le forze di adesione prevalgono su quelle di coesione, la curvatura del liquido sarà concava (innalzamento capillare, il liquido è sottoposto ad una pressione diretta verso l'alto)[12]. La forza della pressione con cui il liquido è attratto verso l'alto o verso il basso è pari a:

$$F = 2 \pi r \theta, \quad (6)$$

Dove:

$F$  è la forza della tensione superficiale [N/m],  $2 \pi r$  è la circonferenza del cilindro [m],  $\theta$  è l'angolo di contatto tra il liquido e la parete del cilindro [°].

Quando l'angolo di contatto e la superficie del liquido sono concave, quest'ultimo bagna il solido ( $\theta < 90^\circ$ , innalzamento capillare); viceversa, se l'angolo è ottuso e la superficie convessa, il liquido non bagna il solido ( $\theta > 90^\circ$ , depressione capillare). Se il raccordo è tangenziale (angolo nullo) il liquido bagna perfettamente il solido, come nel contatto acqua-mattone. La formazione del menisco causa una variazione di pressione locale definibile per singolo capillare mediante l'equazione di Washburn, che descrive il movimento orizzontale del menisco in un sistema capillare:

$$P = \frac{2 \mathcal{T} \cos \theta}{r}, \quad (7)$$

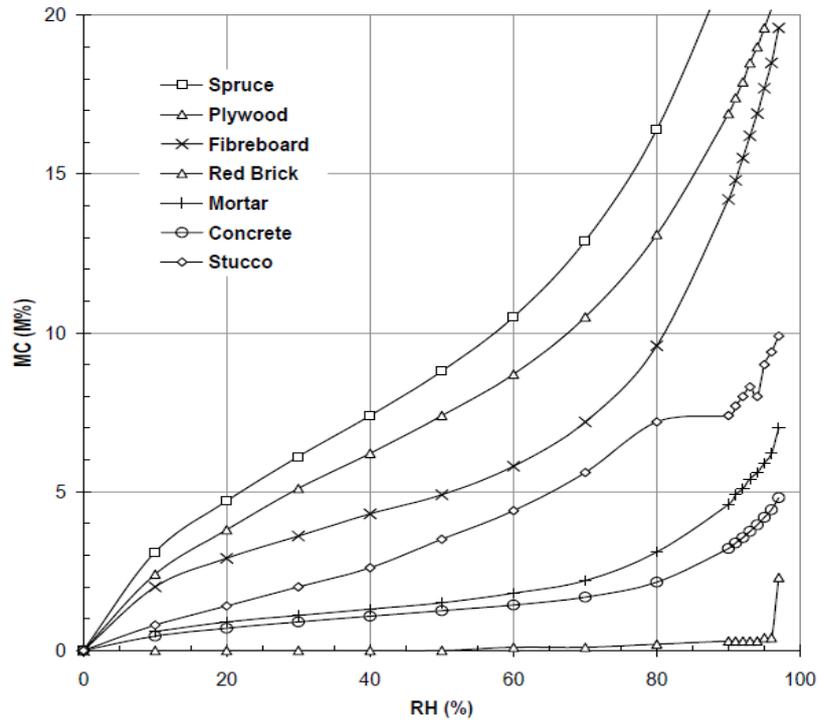


Figura 2. Isotherme di adsorbimento di vari materiali igroscopici [8].

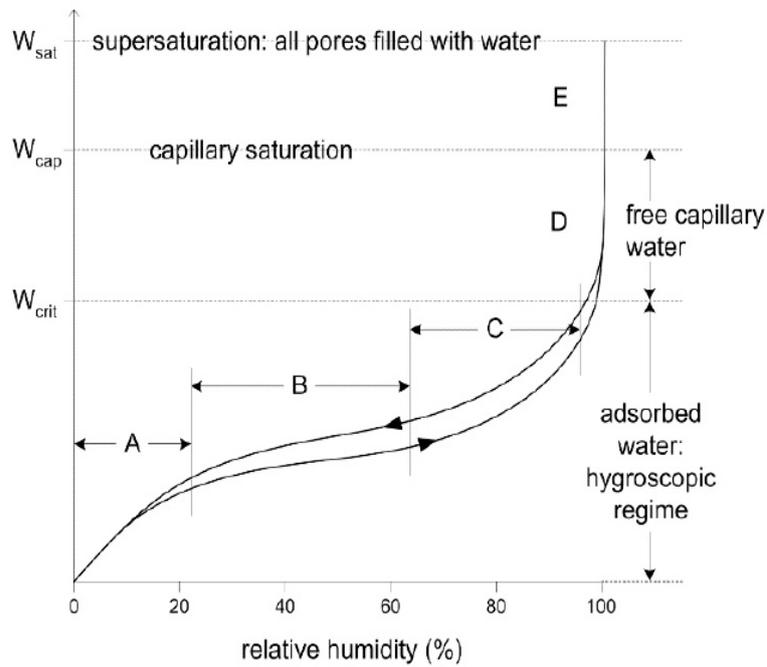


Figura 3. Regime di stoccaggio dell'umidità nei materiali igroscopici porosi [6]: A – singolo strato di molecole d'acqua assorbite, B – multistrato di molecole d'acqua assorbite, C – strato di interconnessione (condensazione capillare interna), D – suzione capillare (acqua libera nei pori), E – regime di sovrassaturazione.

Dove:

$P$  è la pressione capillare [Pa],  $T$  è la tensione superficiale del liquido [N/m],  $\theta$  l'angolo di contatto liquido/solido [°],  $r$  il raggio del tubo capillare [cm].

Il liquido, per compensare la variazione di pressione che avviene all'interno del tubo capillare, risale fino a quando si viene a creare un equilibrio tra la pressione capillare  $P_c$  e la pressione idrostatica  $P_i$  che spinge il liquido in direzione opposta: si parla di suzione capillare.

### 1.2.2.1 Modello di Jurin

La risalita capillare come specificata dalla legge di Jurin [13], [14], [15], definisce che l'altezza massima  $h$  raggiunta dall'acqua all'interno di un capillare è inversamente proporzionale al raggio del capillare  $r$  e della densità del liquido  $\rho$ , e direttamente proporzionale alla tensione superficiale  $T$  e all'angolo del menisco  $\theta$ . L'altezza di risalita capillare in un tubo di sezione circolare è espressa dall'equazione (8):

$$h = \frac{2 T \cos\theta}{\rho g r}, \quad (8)$$

Dove:

$T$  è la tensione superficiale del liquido (H<sub>2</sub>O a 20°C pari a 0.072 N/m) [N/m],  $\theta$  l'angolo di contatto liquido/solido [°],  $\rho$  la densità del liquido (H<sub>2</sub>O pari a 0.9998 g/cm<sup>3</sup>) [g/cm<sup>3</sup>],  $g$  l'accelerazione di gravità [cm/s<sup>2</sup>],  $r$  il raggio del tubo capillare [cm].

Con tale equazione si otterrà che il limite teorico di altezza massima di risalita per un raggio dei pori compreso tra 0.1 e 1 μm (tipico dei materiali da costruzione), risulta di circa 15 m (più stretto è il capillare più risulta evidente il fenomeno della capillarità). Tale descrizione non corrisponde esattamente alla situazione reale, in cui i capillari dei materiali costruttivi possono subire delle variazioni di geometria (forma, diametro) e di tortuosità.

Inoltre, l'equazione non considera il caso reale in cui si ha anche l'influenza del fenomeno di evaporazione, che determina una variazione di quantità di acqua dipendente dalle condizioni al contorno (temperatura, umidità dell'aria e velocità del flusso d'aria)[16].

### 1.2.2.2 Modello di Helmholtz, Gouy-Chapman e Stern

Il fenomeno di risalita è governato sia dalle tensioni superficiali dell'acqua a contatto con le superfici interne (Jurin), sia dalla differenza di potenziale elettrico dovuta al "doppio strato" di dipoli d'acqua (Helmholtz, 1879) [17], [18]. Si tratta di un fenomeno chimico-fisico in cui le molecole d'acqua contenute nel terreno, assoggettate all'azione del potenziale elettrico, tendono a spostarsi naturalmente verso le zone in cui il concentrato di soluto è in eccesso, comportandosi come una soluzione ionica in condizione di non equilibrio e dando origine agli "ioni liberi" che saranno richiamati elettricamente dal basso verso l'alto. Gli ioni con carica positiva vicini alla superficie solida caricata negativamente, si disporranno parallelamente alla superficie (strato di Helmholtz). Il medesimo comportamento si verifica in un materiale poroso, che ha le superfici dei pori caricate negativamente grazie alla presenza di Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e SiO<sub>2</sub>, creando uno strato d'acqua

adsorbito aderente al silicio. L'equilibrio viene raggiunto quando particelle di carica opposta (positiva) raggiungono le pareti, dando origine al doppio strato elettrico. Il potenziale elettrico diminuisce linearmente in funzione della distanza dalla superficie.

A questo modello segue quello di Gouy-Chapman (Gouy, 1910; Chapman, 1913)[18] dello "strato diffuso" (Figura 4), che ipotizza una zona di interazione liquido-solido più debole della precedente, considerando la normale tendenza degli ioni di diffondersi nello strato, con una diminuzione esponenziale a zero spostandosi verso il centro della massa del liquido. Infine, il modello di Stern (Stern, 1924) del "doppio strato diffuso"[18] è costituito da (i) uno strato di ioni adsorbiti sulla superficie a contatto con il solido, in cui si dispongono cationi con bassa densità di carica, e da (ii) uno strato diffuso (Gouy-Chapman) in cui si dispongono cationi con elevata densità di carica. Nella zona a contatto con il solido il potenziale elettrico decresce linearmente con l'aumentare della distanza, nello strato diffuso decresce in modo esponenziale.

Nel doppio strato elettrico, ma oltre lo strato di Stern, si considera il potenziale zeta  $\xi$  [18], che determina il comportamento elettrocinetico delle particelle. Tale parametro dipende dalla viscosità del liquido, dal potenziale elettrico, lo spessore del "doppio strato" e dalla costante dielettrica del liquido. Il potenziale zeta può essere misurato anche in un caso di reale di muratura, tra due punti posti a diversa altezza: positivo alla base della muratura, negativo in punto più in alto sul muro bagnato; per valori prossimi allo zero, significa che non vi è flusso capillare di risalita.

La migrazione dell'acqua nelle costruzioni edili, il naturale tasso di evaporazione e le condizioni al contorno (tipologia materiale, spessore muratura, tipologia terreno, quantità di acqua nella fondazione, condizioni microclimatiche) producono il movimento del doppio strato di Helmholtz, da cui si genera una differenza di potenziale elettrico variabile che alimenta la risalita dell'acqua nella muratura, con intensità da 10-20 mV (risalita debole) fino a 300-500 mV (risalita forte).

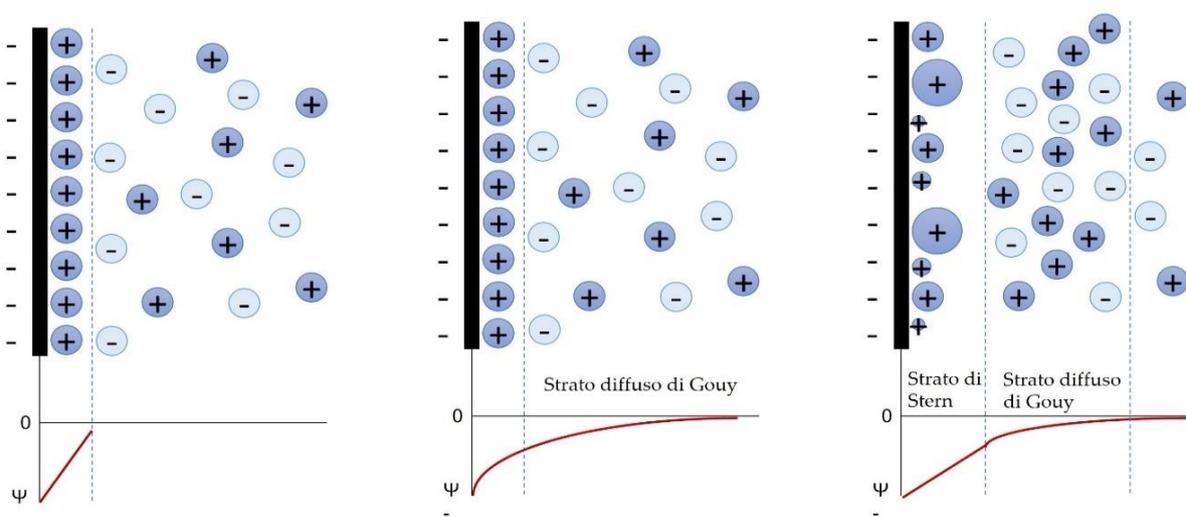


Figura 4. Esplicazione grafica modelli del doppio strato di Helmholtz, strato diffuso di Gouy-Chapman e Stern.

### 1.2.2.3 Modello di Hall-Hoff

Il fenomeno di risalita in una sezione muraria è il risultato di un equilibrio tra la quantità di acqua assorbita dal terreno di fondazione  $U$  e la quantità di acqua che evapora attraverso la superficie libera  $E$  [16], [19], [20]. La quantità di acqua assorbita è funzione della capacità di assorbimento per capillarità del materiale lapideo  $S$  (*sorptivity*<sup>3</sup>) e del tempo trascorso  $t$  (9):

$$U = b \frac{di}{dt} = \frac{bS^2}{2i}, \quad (9)$$

Dove:

$b$  è lo spessore della muratura [m],  $i$  è la quantità di acqua assorbita in una sezione di muratura [g],  $t$  il tempo trascorso [s],  $S$  la capacità (tasso) di assorbimento/desorbimento per capillarità del materiale lapideo.

Si consideri una struttura in contatto idraulico con il suolo, come in Figura 5 (a), di spessore  $b$  e altezza illimitata, costituita da un materiale poroso omogeneo. Dal momento che l'umidità di risalita deriva dall'assorbimento capillare di acqua lungo il confine alla base della struttura a contatto con il terreno (dipendente dalle proprietà di assorbimento del materiale di cui è composta la parete) e l'evaporazione avviene lungo i lati, si indica che il tasso totale di assorbimento alla base è pari a  $U$ , e il tasso totale di evaporazione sia  $E$ . Definendo l'altezza di risalita capillare pari ad  $h$ , si assume un valore stazionario di  $U = E$ , bilanciando quindi l'acqua "in entrata" e "in uscita".

Ponendo  $i = S t^{1/2}$ , legge fisica che descrive la quantità di acqua assorbita da una sezione di muratura nel tempo  $t$ , e  $i = \theta_w h$  che rappresenta la quantità di acqua presente fino all'altezza di risalita massima, si ha (10):

$$h_{ss} = \frac{(bS^2)}{(2\theta_w h)}, \quad (10)$$

Dove:

$h_{ss}$  è l'altezza di risalita in stato stazionario,  $S$  è il grado di assorbimento/desorbimento del materiale lapideo (definito dalla teoria del flusso insaturo e della diffusione capillare),  $t$  il tempo trascorso [s],  $\theta_w$  il contenuto umido della parete bagnata,  $h$  è l'altezza di risalita [m],  $b$  lo spessore della muratura [m].

La quantità di acqua smaltita per evaporazione dipende dall'altezza di risalita  $h$  (altezza dell'area umida) e dalla velocità di evaporazione  $e$ , variabile in funzione dei parametri ambientali (temperatura, umidità e velocità dell'aria), dimostrando la proporzionalità inversa tra il fenomeno evaporativo e l'altezza di risalita. L'altezza di risalita dell'acqua è quindi direttamente proporzionale al grado di assorbimento/desorbimento del materiale:

$$E = e h, \quad (11)$$

---

<sup>3</sup> Sorptivity: tendenza di un materiale poroso ad assorbire e trasmettere un liquido per capillarità (es. nel caso del mattone è il tasso con cui l'acqua è assorbita nello stesso, fino a saturazione).

$$h = S \left( \frac{b}{2e\theta_w} \right)^{1/2}, \quad (12)$$

L'equazione (12) afferma quindi che, se decresce il tasso di evaporazione, l'altezza di risalita aumenta.

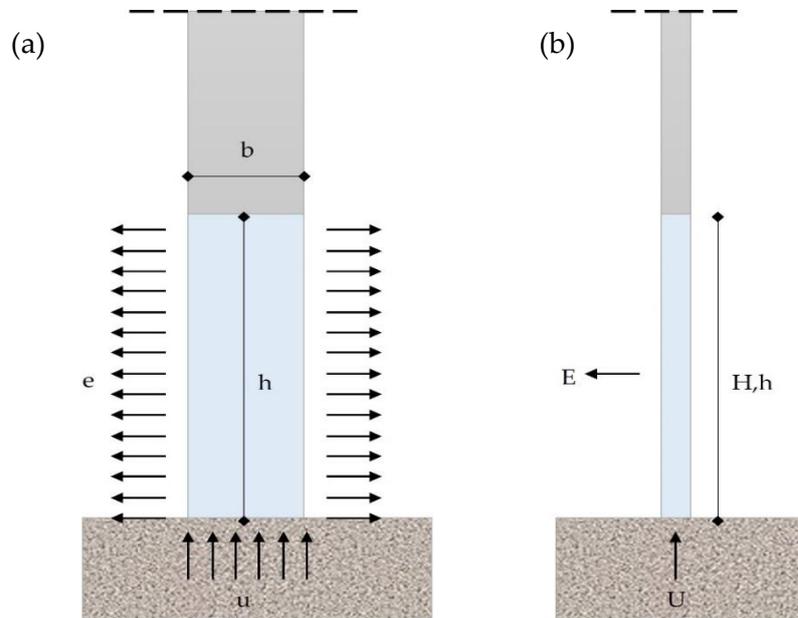


Figura 5. (a) Modello fisico di risalita capillare in un muro generico. (b) Modello SF (Sharp Front Theory).

### 1.2.3 La risalita capillare nelle murature

Come accennato (§ 1.2.2), in opposizione alla legge di gravità, l'acqua a contatto con materiali porosi come la muratura risale attraverso i capillari, per un'altezza che dipende dalla dimensione del sistema capillare interno e dalle caratteristiche del materiale stesso, fin quando si stabilisce un equilibrio tra pressione capillare  $P_c$  e pressione idrostatica  $P_i$ . L'altezza massima [m] di risalita capillare dell'acqua  $h_{max}$  in una muratura, definito il raggio  $r$  dei pori [m] e in condizione di perfetta verticalità può essere definita come segue (13):

$$h_{max} = \left( \frac{2}{r} \right) \cdot 15 \cdot 10^{-6}, \quad (13)$$

Nella situazione reale è riscontrato che la forza di capillarità varia in base ad una serie di caratteristiche [6], [21]:

- Proprietà dei materiali cui è composta la muratura (densità, massa volumica, dimensione e tortuosità dei pori, capacità termica, conduttività termica, resistenza alla diffusione del vapore, presenza di sali, Tabella 4)[22];
- Condizioni microclimatiche interne/esterne (temperatura, umidità relativa, radiazione solare, precipitazioni, velocità aria) e caratteristiche di composizione del terreno;
- Presenza di acqua liquida sotto la struttura e concentrazione salina nell'acqua;
- Caratteristiche geometriche e tecnologiche dell'edificio ed eventuali disomogeneità nella struttura;
- Fattore tempo.

Tabella 4. Caratteristiche principali dei materiali per il trasporto dell'acqua.

Caratteristica	Simbolo	Unità di misura	Descrizione
Porosità	$\varphi$	% in volume	Proprietà del materiale di assorbire e contenere acqua al suo interno. Si distingue in porosità chiusa (pori non comunicanti tra loro, es. materiali impermeabili), aperta (pori comunicanti tra loro accessibili all'acqua - capillari) e interconnessa.
Permeabilità	k	kg/msPa	Capacità di un materiale di farsi attraversare dall'acqua.
Imbibizione	$C_i$	% in peso	Quantità di acqua che un materiale può assorbire se immerso in acqua fino a saturazione.
Resistenza alla diffusione del vapore	$\mu$	-	Rapporto fra la resistenza alla diffusione del vapore del materiale e la resistenza alla diffusione del vapore di uno strato d'aria di uguale spessore.

L'eterogeneità dei materiali che compongono la muratura (laterizio, pietra, malta – materiali a porosità aperta) è derivata dalla diversa distribuzione dei pori negli elementi stessi (Tabella 5), che daranno origine ad una risalita capillare non uniforme. Malta e sabbia hanno una capacità di imbibizione compresa tra il 5% ed il 25%, mentre i mattoni tradizionali tra il 25% ed il 30%, fino ad arrivare ad un 55% nel caso di mattoni prodotti a mano [23]. Più i capillari del materiale sono piccoli, più tendono ad assorbire e trattenere l'umidità al loro interno; se il diametro del capillare è però molto piccolo e di forma tortuosa, il movimento dell'acqua all'interno del capillare stesso sarà molto più lento. Ciò determina che le porosità molto piccole tendono ad assorbire un'elevata quantità di acqua rallentandone il transito; al contrario nei pori di dimensioni maggiori [24]. Le normative UNI EN 1015-18:2004 [25], UNI EN 1925:2000 [26] e UNI EN 772-11:2011 [27] descrivono i metodi di misura dell'assorbimento capillare.

Tabella 5. Classificazione dei pori.

Classificazione	$\varnothing$ [mm]	Caratteristiche
Micropori	< 0.002	L'acqua contenuta non è libera, non influenza il trasporto di umidità
Mesopori	0.002 – 0.05	L'acqua migra sotto le influenze delle forze capillari (pori capillari); avviene anche trasporto di vapore
Macropori	> 0.05	Rilevanti nel trasporto di vapore ma non di acqua (forze capillari deboli)

Il processo di bagnatura del materiale è influenzato anche dalla tensione superficiale  $\mathcal{T}$  e viscosità  $\eta$  del liquido considerato. Generalmente, con l'incremento della temperatura la viscosità diminuisce più velocemente della tensione superficiale.

Nelle murature l'acqua è soggetta ad un movimento ciclico dal basso verso l'alto (con una concentrazione di acqua che varia dal 20-30% nella parte inferiore fino ad arrivare ad un 2-3%, massimo 5% nella parte superiore), la cui velocità, altezza e intensità sono variabili in base alla

temperatura, al tasso di evaporazione dell'acqua attraverso la muratura ed allo spessore della stessa [14], [28]. Per questo motivo le murature sono soggette a cicli stagionali nei climi temperati, con un contenuto d'acqua elevato in primavera (dopo il fenomeno di condensazione invernale) e un contenuto minimo in autunno (dopo un'elevata evaporazione estiva)[29]. Inoltre, la velocità di penetrazione è più rapida all'inizio per poi lentamente diminuire; la quantità di acqua assorbita  $WA$  varia in base alle caratteristiche del materiale  $B$  e linearmente con la radice quadrata del tempo trascorso  $\tau$  [s] [30]:

$$WA = B\sqrt{\tau}, \quad (14)$$

La risalita capillare si stabilizza tra 0.5-2.00 m, depositando un segno di demarcazione orizzontale non netto, ma caratterizzato da una fascia critica con altezza variabile di qualche centimetro e sotto di esso uno scolorimento dato dalla presenza di macchie, muffe (con  $RH > 80\%$ ), esfoliazione degli strati superficiali e presenza di Sali [31], [32]. È in quest'area che si manifestano evidenti disgregazioni superficiali, dovuti al ripetersi di fenomeni di cristallizzazione, solubilizzazione dei Sali, stress meccanici e termici indotti dai continui processi di bagnatura e prosciugamento (con  $RH > 90\%$  e  $T^4 > 15^\circ\text{C}$  [15]).

La risalita capillare dipende inoltre dalla tipologia del terreno in cui si trova la struttura muraria, dimostrando come il fenomeno sia estremamente variabile e influenzato dalle condizioni esterne [33]. Esistono due situazioni di umidità di risalita muraria [24]:

- Risalita primaria, quando il livello della falda acquifera è molto vicina alla quota del suolo e la base della muratura è a diretto contatto con la frangia capillare (o vi è un'elevata concentrazione di acqua liquida), quindi l'umidità si trasferisce sulla muratura esclusivamente attraverso la superficie di contatto con il terreno – si verifica soprattutto in edifici storici;
- Risalita secondaria, quando gli apporti di acqua provengono da diverse fonti (acque superficiali disperse, perdite da tubazioni, acqua meteorica, condensazione superficiale), con risalita da apporti laterali su murature non protette/impermeabilizzate.

#### 1.2.4 Sali solubili

I Sali igroscopici contenuti nell'acqua (solfati, nitrati, nitriti, cloruri e carbonati) sono un grave problema all'interno dei manufatti, in quanto si manifestano quando l'acqua evapora dalla muratura con conseguente asciugatura del materiale. Tali sostanze possono essere trasportate nelle costruzioni dall'inquinamento atmosferico, dal mare e dal terreno per umidità di risalita; sono quindi in grado di assorbire umidità dall'aria e dare origine a fenomeni di cristallizzazione. La cristallizzazione, uno dei processi più pericolosi, determina un aumento della pressione all'interno dei Sali con una scala di grandezza decisamente superiore alla resistenza a trazione dei vari materiali da costruzione. Tale fenomeno ha origine per evaporazione del solvente ( $\text{H}_2\text{O}$ ) sulle superfici o all'interno dei pori, in seguito al raggiungimento della saturazione della soluzione e dipendente dalla porosità dei materiali, con aumento dell'aggressività quanto più rapidi sono i cicli di umidificazione ed essiccazione del materiale. I degni visibili, che creano

---

<sup>4</sup> Temperatura dell'aria

stati di trazione nel materiale, sono [34]: efflorescenza, quando la cristallizzazione si verifica sulla superficie d'evaporazione, corrodendo la superficie dei laterizi, impoverendo i giunti di malta, staccando parti di intonaco e riducendo le caratteristiche meccaniche dei materiali; cripto efflorescenza o subflorescenza, quando la cristallizzazione ha luogo all'interno dei pori, con un aumento del flusso evaporativo rispetto al flusso capillare [2]. Le prime sono poco dannose e possono essere rimosse mediante spazzolatura; le seconde dovranno essere estratte e rimosse con impacchi (es. argilla sepiolite e polpa di cellulosa), che diluiscono i Sali e li portano in superficie, dove potranno poi essere facilmente rimossi.

Un muro si può considerare contaminato quando i Sali solubili al suo interno variano tra uno 0.3% fino ad un 3% in peso (Tabella 6). I Sali presenti nelle murature sono associati a quattro metalli principali: calcio (Ca), sodio (Na), magnesio (Mg) e potassio (K), con un'influenza anche di Sali complessi (ettringite e thaumasite, alla presenza di malte a base di cemento) [2]. L'altezza di distribuzione dei Sali nelle murature dipende dal frazionamento delle diverse tipologie esistenti nell'acqua [35].

I solfati derivano dall'acido solforico  $H_2SO_4$  spesso alla base dei materiali da costruzione, o provenienti da smog, pioggia acida e impregnazione nel terreno. La loro pericolosità deriva dalla possibilità di incrementare il volume in fase di cristallizzazione, provocando sub-efflorescenze e disintegrando il materiale per l'aumento di pressione all'interno dei pori. Danno origine a sgretolamenti e corrosioni superficiali, distacco dell'intonaco. Tra i solfati si distinguono:

- Solfati alcalini, molto solubili in acqua, formano efflorescenze solo se presenti in grandi quantità. Il solfato di sodio  $Na_2SO_4$  origina depositi pulverulenti o arborescenti che possono provocare il distacco delle tinteggiature; il solfato di potassio  $K_2SO_4$  forma una pellicola sulla superficie muraria che altera cromaticamente il supporto.
- Solfato di magnesio  $MgSO_4$ , spesso presente nelle murature in laterizio, provoca efflorescenze pulverulente con cristalli aghiformi ramificati. Dà origine a patine superficiali, disgregazione del laterizio e distacco dell'intonaco in caso di cristallizzazione.
- Solfato di calcio  $CaSO_4$ , non è solubile in acqua ed appare come un deposito bianco superficiale. Se combinato con un altro sale diventa più solubile, mostrando le medesime caratteristiche del solfato di magnesio.

Tabella 6. Degradamento superficiale di un muro in termini di Sali totali [2].

<b>Substrato</b>	<b>% Sali totali in peso</b>	<b>Danni</b>	<b>Rischio</b>
Pulito	< 0.20%	Nessuno	Nessuno
Poco contaminato	0.30 – 0.50%	Pochi, non visibili	Basso
Mediamente contaminato	0.60 – 1.50%	Danni visibili	Medio
Molto contaminato	1.60 – 3.00%	Danni diffusi	Alto
Gravemente contaminato	> 3.00%	Distruzioni estese	Grave

Nitrati e nitriti derivano dall'acido nitrico  $HNO_3$  e acido nitroso  $HNO_2$  la cui origine è dovuta al deposito e decomposizione di materiale organico, acque deliquescenti o falde inquinate, soprattutto in zone rurali dove tali acidi sono utilizzati nei prodotti fertilizzanti. Il nitrato di

calcio, quello più dannoso, cristallizza ad una temperatura di 25°C e umidità relativa del 50%, provocando fenomeni di corrosione. Tra i nitrati si distinguono:

- Nitrato di sodio  $\text{NaNO}_3$  e nitrato di potassio  $\text{KNO}_3$ , molto solubili e presenti nel suolo in grande quantità.
- Nitrato di magnesio  $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$ , cristallizza solo se  $\text{RH} < 50\%$ .
- Nitrato di calcio  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ , molto igroscopico e vulnerabile al gelo.

I cloruri derivano dall'acido cloridrico  $\text{HCl}$ , presente nelle zone marine sotto forma di cloruro di sodio  $\text{NaCl}$ . Sono dannosi se si trovano nell'acqua di impasto delle malte, perché in combinazione con altri Sali (soprattutto solfati) diventano igroscopici. Per arrivare al fenomeno di cristallizzazione hanno bisogno di percentuali di umidità relativa molto basse. Tra questi Sali, il cloruro di sodio  $\text{NaCl}$  e il cloruro di calcio  $\text{CaCl}_2$  danno origine a depositi salini di colore bianco, muffe, alterazioni cromatiche, distacchi e disgregazione degli intonaci. Cristallizzano a temperature ed umidità relativa molto basse.

I carbonati derivano dall'acido carbonico  $\text{H}_2\text{CO}_3$  e sono molto idrosolubili. Le sostanze organiche, perdendo idrogeno e ossigeno ed arricchendosi di carbonio, danno origine al fenomeno della carbonatazione.

### 1.2.5 Tipologie di degrado

Le tipologie di degrado che si possono verificare nelle murature sono in grado di determinare danni alla struttura di tipo statico, estetico (macchie bianche, efflorescenze e sub-efflorescenze in profondità), alla salute degli utenti (aumento delle malattie respiratorie del 30-50% [1], [2], malesseri e diminuzione del comfort termico) ed economici (costi elevati per il riscaldamento e la deumidificazione) [31]. Generalmente si identificano secondo le seguenti forme [36], [37]:

- Fisico-meccanico, come cristallizzazione dei Sali (aumentando di circa il 10% in volume rispetto allo stato liquido), disgregazione delle superfici dovute al gelo ( $\text{RH} < 25\%$ ), erosione, dilatazione, alveolazioni, desquamazione, sfarinamento, riduzione del potere isolante;
- Chimico, come dissoluzione dei Sali solubili, ossidazione, solfatazione, ecc.;
- Biologico, proliferazione di microflora/macroflora che si verifica in presenza di  $\text{RH} = 75\text{-}85\%$ .

Il degrado fisico può dare origine a perdite di isolamento termico (perdita capacità isolante del 5% per ogni 1% di aumento del contenuto umido) e aumento della conducibilità termica dei materiali, variabile dal 30 al 50% su una muratura satura di acqua, con conseguente causa di dispersione del calore ed elevati costi per il riscaldamento degli ambienti [38].

Il degrado meccanico-strutturale inizia con lo sfarinamento delle pitture, il distacco dell'intonaco fino ad arrivare ad una vera e propria disgregazione della muratura interna con una perdita fino al 50% della resistenza alla compressione uniassiale, dovuta all'impregnazione dell'acqua [39]. All'aumento del contenuto di umidità corrisponde una diminuzione della resistenza meccanica, correlato a espansioni termiche derivanti da cicli termici giornalieri e/o stagionali e cicli di gelo-disgelo che provocano un aumento di volume (fino al 10%) e di pressione capillare, rompendo le pareti dei capillari [29].

Il degrado chimico è correlato all'interazione dell'acqua con il materiale, che può dare origine a fenomeni di idratazione, idrolisi, dissoluzione, carbonatazione od ossidazione. Questo tipo di deterioramento può avvenire sia per contatto del materiale con acqua piovana, con ambiente alcalino e con inquinanti presenti in atmosfera [29]. La manifestazione avviene attraverso macchie superficiali alla base della muratura o nella zona limite tra superficie umida ed asciutta, con oscillazioni di altezza variabile stagionalmente, perché continuamente sollecitata da cicli di inumidimento e asciugatura, con conseguente frantumazione del materiale.

Il degrado biologico è determinato da organismi viventi animali (biodeteriogeni) e/o vegetali che determinano l'alterazione del substrato sul materiale interessato. Si manifesta principalmente in ambienti caratterizzati da elevata umidità relativa ( $RH > 65-70\%$ ) e temperatura ( $T > 30^{\circ}\text{C}$ ), scarsa ventilazione, elevata luminosità e apporto di sostanze organiche [40]. Gli organismi viventi che danno origine a questo fenomeno si possono distinguere in: autotrofi, capace di sintetizzare sostanze organiche partendo da sostanze inorganiche sfruttando energia luminosa, come batteri (cocchi o bacilli che traggono energia dall'ossidazione di sostanze inorganiche), cianofitiche, alghe e licheni; eterotrofi, incapaci di sintetizzare sostanze organiche partendo da sostanze inorganiche, come batteri, funghi (che danno origine alle muffe) ed animali in genere.

Infine, il degrado antropico è definito come una forma di alterazione o modifica dello stato di conservazione di un bene culturale, provocato da atti di vandalismo, collocazione impropria di elementi tecnologici di impianti, uso improprio dei materiali da costruzione e assenza di manutenzione.



## 2. Diagnosi e monitoraggio

*Diagnosi e monitoraggio sono essenziali per individuare le aree maggiormente influenzate dal fenomeno dell'umidità e comprendere le cause strutturali o transitorie di instabilità, in modo da poter collocare nella giusta prospettiva il problema del risanamento, aumentare la durabilità degli elementi costruttivi e organizzare un database per varie tipologie di progetti di riferimento.*

*L'individuazione delle aree interessate dal fenomeno di risalita capillare avviene con metodologie differenti, sia invasive/distruttive mediante campionamenti di materiale in loco, che non invasive/non distruttive, il cui utilizzo è adatto anche al patrimonio storico-culturale. Tali metodologie, opportunamente scelte in base al luogo da indagare, permettono di valutare sia qualitativamente che quantitativamente il contenuto acqueo all'interno della struttura.*

*Qualunque tecnologia si utilizzi, è richiesta una approfondita conoscenza della strumentazione analizzata e dell'edificio che si sta indagando. È fondamentale quindi avere una completa conoscenza del manufatto e del luogo analizzato, e solo in un secondo momento procedere all'acquisizione ed elaborazione dei dati vera e propria. Il ritardo nella diagnosi non farà altro che accrescere le conseguenze del danno.*

L'umidità da risalita capillare non è stata finora analizzata come un fattore di rischio specifico, ma solamente come un disagio abitativo e di fruizione, per cui non esiste una vera e propria normativa di riferimento che definisca i metodi corretti di diagnosi, esecuzione degli interventi e modalità di collaudo, ma sono state elaborate raccomandazioni in materia di accertamento analitico e diagnostico, nel campo della conservazione dei beni culturali e di tutte le fabbriche in muratura, emanate dalla commissione NorMaL<sup>5</sup> [41]. Per la conservazione del patrimonio storico e culturale di edifici danneggiati da umidità si fa riferimento alla norma EN 16682 [42], che sottolinea la necessità di non eseguire tecniche di diagnosi distruttive.

Le misure di umidità all'interno dei solidi risultano complicate in quanto può esistere un contenuto fisiologico di umidità<sup>6</sup>, dovuto alla naturale tendenza del materiale a porsi in equilibrio con l'ambiente circostante. Perciò la fase di diagnosi richiede una completa conoscenza dell'oggetto edilizio, secondo differenti fasi [36], [43]:

- Conoscenza e definizione – analisi di carattere storico/ambientale, mappatura tematica e verifica delle condizioni del manufatto edilizio (localizzazione, contesto ambientale/urbanistico, destinazione d'uso, materiali costituenti la struttura, stato di conservazione delle superfici, analisi storico-evolutive);
- Monitoraggio ambientale [41] – conoscenza delle condizioni al contorno e degli ambienti interni, valutandone l'eventuale propensione al degrado secondo i parametri di temperatura dell'aria, temperatura radiante, umidità relativa, velocità e direzione del vento, precipitazioni meteoriche, illuminazione, irraggiamento e presenza di inquinanti;
- Rilievo e acquisizione dati – quantificazione e distribuzione del grado di umidità e cause, mediante metodi distruttivi e non distruttivi [31], [44], [45];
- Rielaborazione dati – progettazione e modellazione della tipologia di intervento da eseguire, con tecnologie e prodotti certificati, il tutto corredato da un piano di collaudo.

In Appendice A si trovano una serie di applicazioni di sistemi di monitoraggio, reperiti in letteratura, su sperimentazioni in laboratorio (modelli di muratura a scala reale).

Tabella 7. Classificazione tecniche di monitoraggio

<b>Dirette / distruttive</b>	Metodo gravimetrico
	Metodo carburo di calcio
<b>Indirette / non distruttive</b>	Metodo capacitivo
	Metodo resistivo
	Georadar
	NMR
	Termografia IR
	Ultrasuoni
	DTS

<sup>5</sup> NORmativa Manufatti Lapidari

<sup>6</sup> Umidità fisiologica,  $U_{a,r}$ : contenuto di umidità del materiale in equilibrio termodinamico con un ambiente in condizioni standard di temperatura e grado idrometrico (T 20°C e UR 50%), ovvero:  $U_{a,r} [\%] = (m_f - m_a) \cdot 100 / m_a$

Dove  $m_f$  è la massa fisiologica del campione all'equilibrio termodinamico in ambiente standard,  $m_a$  è la massa del campione asciutto.

## 2.1 Prove dirette o distruttive

Le tecniche classiche, considerate distruttive, richiedono il prelievo di campioni di materiale nella muratura (polvere o carota  $\varnothing$  2 cm) e l'inserimento di una o più sonde, con la possibilità di ottenere risultati quantitativi ma compromettendone la struttura.

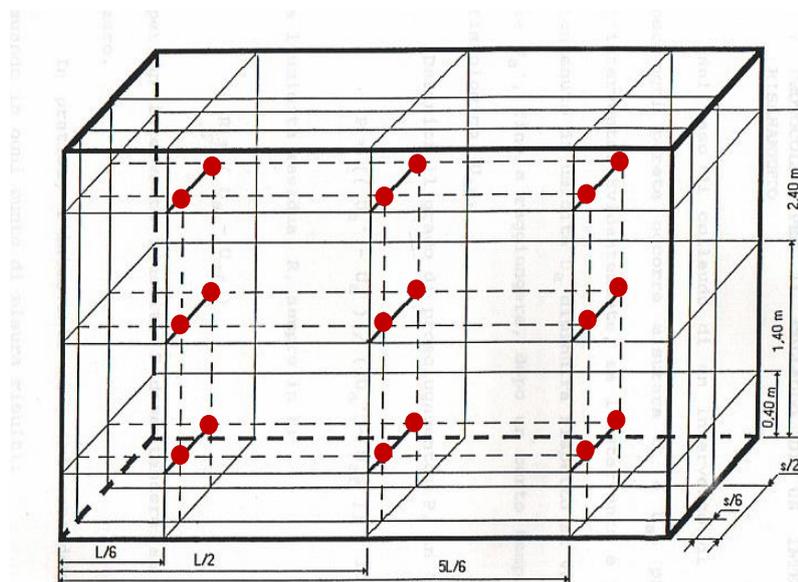


Figura 6. Schema dei punti di prelievo nella parete.

Ai fini della caratterizzazione igrometrica per ogni parete di spessore  $s$  e lunghezza  $L$ , i campioni di muratura vanno prelevati in 3 piani verticali perpendicolari alla parete e posti a  $L/6$ ,  $L/2$  e  $5L/6$ . In ogni piano, vanno effettuati 6 prelievi, a 3 altezze (40 cm, 140 cm e 240 cm) e 2 profondità ( $s/2$  e  $s/6$ ) (Figura 6). Dei campioni prelevati va misurato il contenuto di umidità  $U_a$ , l'umidità fisiologica  $U_f$  (provino in camera climatizzata, con  $T = 10-25^\circ\text{C}$  e  $\text{RH} = 50-85\%$ ), il grado di prosciugamento  $P$  (con valore limite del 75%) e l'umidità residua  $R$  (con valore limite del 3%) [41].

### 2.1.1 Metodo gravimetrico o ponderale

La prova distruttiva gravimetrica (UNI 11085:2003 [45], [46], [47]) consiste nella misura diretta del contenuto d'acqua mediante il prelievo di un campione di materiale (polvere o pezzi, per una massa compresa tra i 2 e i 50 g) estratto con l'ausilio di un trapano a basso numero di giri e successiva pesatura dello stesso con termobilancia, prima e dopo l'intervento di disidratazione, che avviene in forno ad una temperatura di  $105^\circ\text{C}$  per cicli di 4 ore, fino al raggiungimento di una massa costante. La differenza di peso corrisponde alla massa d'acqua evaporata dal campione, espressa come percentuale della massa del campione essiccato nel forno.

$$C_a = \frac{M_u - M_s}{M_s} \times 100, \quad (15)$$

Dove:

$C_a$  contenuto d'acqua [%] o MC - Moisture Content<sup>7</sup> [%],  $M_u$  massa iniziale del campione (umida) [g],  $M_s$  massa del campione dopo l'essiccazione [g].

Il risultato ottenuto è una lettura assoluta, espressa in %, delle molecole di acqua libera all'interno del materiale, indipendentemente dalla sua densità e dalla modalità di distribuzione delle stesse (i valori di contenuto d'acqua che superano il 3% in peso si possono considerare eccessivi, indicano quindi una muratura molto umida).

Mediante tale prova, oltre al contenuto di umidità è possibile conoscere anche il contenuto di umidità fisiologica  $U_f$  e l'eccesso di acqua<sup>8</sup>.

Tra i vantaggi di questa prova si ricorda la possibilità di ottenere risultati non influenzati dalla presenza di Sali, distinguendo il contenuto umido proveniente da risalita capillare o igroscopicità, ed eseguire le prove sia in superficie che in profondità con costi relativamente contenuti. Inoltre, in seguito alla determinazione del contenuto di umidità nella polvere prelevata, è possibile eseguire ulteriori verifiche relativamente la composizione chimica o mineralogica del materiale. Nonostante la tecnica sia normata e dia un risultato accurato in termini quantitativi del contenuto umido all'interno di un manufatto, non può essere eseguita su pareti di particolare pregio artistico/architettonico.

### 2.1.2 Metodo del carburo di calcio

La tecnica del carburo di calcio (UNI 11121:2004 [45], [48]) è una tecnica molto precisa basata sulla misurazione della quantità d'acqua contenuta nella muratura. La reazione chimica che si viene a creare tra l'acqua contenuta nelle polveri estratte dalla muratura (5-10 g) ed il carburo di calcio  $CaC_2$ ; tale reazione provoca la formazione dell'acetilene  $C_2H_2$  e dell'idrossido di calcio  $Ca(OH)_2$ . L'acetilene che si sprigiona dalla reazione determina un aumento di pressione direttamente proporzionale alla quantità di acqua presente nel campione, misurabile mediante un manometro.



Il metodo di esecuzione prevede che si inseriscano in un recipiente metallico a tenuta, delle sfere di acciaio ( $\varnothing$  5-15 mm), il cloruro di calcio e il campione di materiale estratto mediante prelievo meccanico (scalpello e mazzetta), macinato e pesato. Il contenitore dev'essere agitato in modo circolare per consentire la frantumazione del materiale; la prova si intende ultimata quando la pressione si stabilizza. La pressione finale misurata dall'apparecchio permette di determinare la quantità di umidità all'interno del campione, espressa in peso.

Tale metodo può comportare la perdita di umidità durante la perforazione del muro e il prelievo del campione, portando in alcuni casi alla sottovalutazione del contenuto di umidità del 2-3% in peso [49].

---

<sup>7</sup> Moisture Content: quantità di acqua rilevata in un dato momento e in un dato materiale, come risultato degli scambi tra materiale e ambiente circostante. Può essere definito anche come la quantità d'acqua di origine esterna contenuta in un materiale non solubile, aggiuntiva rispetto a quella chimicamente presente nella sua composizione.

<sup>8</sup> Eccesso di acqua: grandezza che indica la quantità dell'invasione umida e quindi la quantità di acqua che dev'essere allontanata dalla muratura per il risanamento.

## 2.2 Prove indirette o non distruttive

Le tecniche non distruttive si possono utilizzare liberamente anche in zone geograficamente fragili (es. sismiche) o in parti dell'edificio delicate e prestigiose (es. superfici affrescate), basandosi sui principi che collegano le proprietà fisiche della muratura al contenuto di umidità in modo indiretto, mantenendo integra la struttura. A loro volta, i metodi possono essere di tipo invasivo o non invasivo, a seconda che le prove richiedano o meno l'esecuzione di fori per l'inserimento di sensori o sonde. Le tecniche invasive, vista la possibilità di una limitata perdita di materiale, sono raramente utilizzate negli edifici storici, per non incidere sulla valenza storico-architettonica degli stessi; le tecniche non invasive sfruttano l'emissione di un flusso energetico, e sono incentrate sulla dipendenza della massa da permittività elettrica (o costante dielettrica) e conduttività.

Tali metodi non permettono però di leggere il diretto contenuto di umidità all'interno della struttura, ma di registrare valori relativi alla scala arbitraria definita (solitamente in %), a seconda dello strumento utilizzato. I vantaggi di tali prove sono la maggior velocità di acquisizione dei dati, ottenendo una conoscenza globale sull'integrità del manufatto indagato a costi ridotti e con semplicità di restituzione delle informazioni.

### 2.2.1 Metodo capacitivo

Il metodo prevede l'utilizzo di elettrodi inseriti all'interno della muratura (o superficiali), che generano impulsi elettromagnetici (durata 10 s) per registrare la capacità elettrica e determinare di conseguenza il contenuto di umidità, senza l'influenza del contenuto salino, ad eccezione del caso di deliquescenze [45], [47], [50], [51], [52]. I misuratori si basano sulla valutazione della costante dielettrica<sup>9</sup> del materiale, in funzione del contenuto di umidità: all'aumentare dell'umidità, aumenta la costante dielettrica relativa [53]. La costante dielettrica  $\epsilon$  identifica il comportamento delle molecole sotto l'effetto di un campo elettromagnetico alternato e l'energia dissipata dal materiale dopo il rilascio del campo elettromagnetico. Il metodo può essere influenzato dalla presenza di cavità, discontinuità interne, elementi metallici o pellicole d'acqua derivate da uno strato di condensa superficiale, che operano come schermi del campo elettromagnetico.

Il metodo è stato implementato con la Time Domain Reflectometry (TDR)[45], [54], [55], [56], [57] che misura l'intervallo di tempo che un impulso elettromagnetico ad alta frequenza (1 GHz) impiega per propagarsi e poi riflettersi dall'origine della linea di trasmissione al termine della sonda, trasmesso tramite un'onda guida (sonda) posizionata sulla superficie del materiale testato. È importante considerare che la risposta del materiale è molto sensibile ai fattori come temperatura, contenuto salino, rugosità, condizioni superficiali e l'eventuale presenza di oggetti metallici vicino al punto di misura.

---

<sup>9</sup> Costante dielettrica,  $\epsilon$ : propensione di un mezzo ad opporsi all'intensità della forza elettrica presente al suo interno. Il valore più basso è quello nel vuoto, detta costante dielettrica assoluta, in cui è pari a  $\epsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2/(\text{N m}^2)$ . La costante dielettrica relativa  $\epsilon_r$  dipende dal mezzo in cui si propaga, ma è sempre maggiore di 1, quindi  $\epsilon_r > \epsilon_0$ : il valore di  $\epsilon_r$  nell'acqua è di circa  $80 \text{ C}^2/(\text{N m}^2)$ , mentre per i materiali asciutti è compresa tra 4 e  $5 \text{ C}^2/(\text{N m}^2)$ .

### 2.2.2 Metodo resistivo

Il metodo resistivo permette di determinare la resistenza elettrica di un materiale ad una corrente elettrica diretta, utilizzando due elettrodi a punta a contatto con la parete (in superficie o in profondità, generalmente compresa tra 1 mm e 10 cm)[47], [50], [51], [58]. Poiché l'acqua liquida con impurità è un buon conduttore, maggiore è il contenuto di umidità del materiale, minore è la resistenza elettrica e più elevata sarà la conducibilità elettrica. L'attendibilità del valore misurato può essere influenzata dalla presenza di Sali od elettroliti che possono far aumentare la conduttività elettrica, anche in presenza di modesti quantitativi di acqua [41], la pressione di contatto applicata agli elettrodi da parte dell'operatore e le irregolarità del materiale. Per una corretta interpretazione dei risultati è necessario che l'operatore specifichi alcune variabili, come temperatura e umidità relativa dell'aria e, in alcuni casi anche la temperatura superficiale del materiale [47].

La resistenza elettrica dei solidi, in funzione dell'umidità, è rappresentata da una relazione lineare fino alla saturazione del solido (intorno al 12-15% del contenuto di umidità), al di sopra del quale si verifica condensa all'interno dei capillari del materiale.

### 2.2.3 Georadar

La tecnica Ground Penetrating Radar (GPR) [45], [54], [59], [60] determina il contenuto, la distribuzione di umidità e la concentrazione di Sali mediante la propagazione di radiazioni elettromagnetiche nello spettro a microonde (fascio di neutroni, frequenza da 100 MHz fino a 5 GHz), basate sull'attenuazione esponenziale della radiazione elettromagnetica. Le onde a bassa frequenza interagiscono con il dipolo dell'acqua contenuto nei materiali, rilevando lo spessore della muratura e le discontinuità presenti (distacchi, crepe, disomogeneità). La generazione e ricezione degli impulsi elettromagnetici è operata da antenne emettitrici/trasmittenti posizionate di fronte alla sorgente (misure per trasparenza se il ricevitore è oltre una parete in esame, misure per riflessione se sorgente e ricevitore si trovano sullo stesso lato) e i dati raccolti sono memorizzati su una unità di controllo (la stessa che genera l'impulso). La propagazione del segnale radar attraverso il materiale dipende dalle proprietà dielettriche dello stesso (permettività, conducibilità e permeabilità magnetica). La velocità del segnale e l'attenuazione descrivono la propagazione delle onde radar nei materiali.

Con questa tecnica è possibile determinare il contenuto di umidità sia in superficie che in profondità, senza l'influenza dei Sali.

### 2.2.4 NMR

La risonanza magnetica nucleare (NMR) [45], [50], [51] è un metodo utilizzato per eseguire una mappatura e una valutazione quantitativa relativamente la distribuzione del contenuto di umidità nel primo strato di muratura. Sfrutta la mobilità molecolare dell'acqua rispetto alla matrice, se esposta a un campo magnetico, con il vantaggio di riconoscere l'acqua in vari stati. Un campo magnetico viene applicato al campione (mediante apparecchio trasmettitore/ricevitore a radiofrequenze) e i nuclei di idrogeno nel materiale, eccitati da impulsi di radiofrequenze, ritornano gradualmente al loro stato energetico al livello del suolo. Si monitora quindi il segnale

caratteristico dell'energia rilasciata dagli atomi durante il decadimento, tempo che fornisce un'indicazione della quantità degli atomi di idrogeno. Poiché ogni molecola di acqua è costituita da due atomi di idrogeno, la quantità nel campione è strettamente correlata alla quantità di acqua. Tra i vantaggi si riscontra la possibilità di ottenere valori quantitativi non influenzati dalla presenza di Sali; il principale punto di debolezza è l'inapplicabilità in presenza di campi magnetici/contaminanti metallici e la presenza di materiali organici (muffe, funghi) che possono alterare o mascherare i risultati.

### 2.2.5 Termografia ad infrarossi

La termografia ad infrarossi (IR) [45], [49], [54], [59], [61], [62], [63], [64] è basata sulla variazione dell'emissione di calore delle superfici umide rispetto a quelle asciutte, grazie all'individuazione della distribuzione della temperatura superficiale e l'aderenza del rivestimento esterno al supporto (discontinuità termiche derivate da vuoti e cavità, elementi metallici, presenza di elementi biologici), misurando la radiazione infrarossa emessa dal corpo. La termografia è quindi la rappresentazione grafica dello stato termico di un corpo, in quanto, tutte le strutture con temperatura superiore allo zero assoluto emettono e assorbono radiazioni infrarosse fino a raggiungere un equilibrio termico.

Le murature emettono una quantità di energia che varia in base all'emissività dell'elemento costruttivo  $\varepsilon$ , in funzione delle proprietà fisiche ed ottiche della superficie indagata. L'emissività  $\varepsilon$ , indica la capacità del materiale di irraggiare energia a determinate lunghezze d'onda; dipende dall'elemento costruttivo considerato, dalla temperatura, dall'angolo di emissione, dalla lunghezza d'onda e dalla finitura superficiale (colore, rugosità). All'aumentare di  $\varepsilon$ , aumenta la capacità del corpo di dissipare calore verso l'ambiente. Con  $\varepsilon = 1$  si rappresenta un corpo nero ideale, con  $\varepsilon < 1$  si hanno corpi reali.

Il principio della termografia si basa sul fatto che qualsiasi oggetto reale che si trovi ad una temperatura  $T > 0$  K, emette un flusso di energia, regolato dalla legge di Stefan-Boltzmann:

$$E = \varepsilon \sigma T^4 \quad (17)$$

Dove:

$E$  è il flusso energetico [ $W/m^2$ ],  $\varepsilon$  è l'emissività ( $\varepsilon = 1$  corpo nero,  $\varepsilon < 1$  corpo reale),  $\sigma$  è la costante di Stefan-Boltzmann ( $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} W/m^2K^4$ ),  $T$  è la temperatura assoluta della superficie interessata [K].

Le procedure di prova della termografia, eseguite con termocamera, possono essere differenziate tra attiva e passiva. Nella termografia attiva è necessario apportare un po' di energia nell'area ispezionata (riscaldamento/raffrescamento), al fine di ottenere significative differenze di temperatura a causa della presenza di anomalie nel substrato. L'immagine termografica è catturata quando il corpo ritorna ad uno stato di equilibrio termico. Nella termografia passiva lo studio ha luogo senza alcuna interferenza di tipo artificiale, rilevando l'energia emessa dall'oggetto indagato in condizioni stazionarie. Un vantaggio della termografia attiva/passiva è la possibilità di ripetere le misure nel tempo in modo rapido e su vaste aree.

Una particolare applicazione della termografia consiste nella rilevazione della distribuzione di umidità nel settore delle costruzioni (valutazione qualitativa), permettendo di ricavare una mappatura comparativa delle superfici, legata anche alla presenza di colonizzazione biologica e macchie. Nelle zone umide la temperatura sarà notevolmente inferiore rispetto le zone asciutte, perché le superfici caratterizzate da evaporazione subiscono un repentino abbassamento di temperatura, causato dall'elevato calore latente di evaporazione (passaggio di stato), con un raffreddamento pari a circa 100-300 W/m<sup>2</sup> [65]. La conversione dell'energia termica infrarossa in segnali elettrici restituisce un'immagine in falsi colori in cui ogni colore corrisponde ad un livello termico rilevato.

I risultati di questa tecnica dipendono da una serie di fattori: l'emissività della superficie studiata, la riflessione derivante dagli oggetti circostanti, l'attenuazione atmosferica delle radiazioni e l'angolo di osservazione dell'oggetto. Se l'oggetto studiato si trova all'esterno è fondamentale considerare anche l'incidenza della radiazione solare diretta/diffusa, l'ombreggiamento e la velocità del vento, in quanto tali fattori possono influenzare i risultati. Le informazioni fornite sono meramente qualitative (il contenuto di acqua non è quantificabile) e influenzate dalle condizioni ambientali, fornendo informazioni solo sullo stato igrometrico superficiale. Per questi motivi è necessario individuare una serie di parametri utili alla calibrazione ed elaborazione dell'immagine, prima dell'esecuzione dei termogrammi, come: emissività, temperatura di riferimento, distanza di acquisizione, umidità relativa (ideale se < 78%) e temperatura atmosferica dell'ambiente di prova (ideale se > 6°C).

### **2.2.6 Ultrasuoni**

I test ultrasonici (US) [54], [59] sono una tecnica acustica basata sulla variazione e propagazione di onde elastiche ad alta frequenza (20Hz-200kHz) all'interno di un materiale (mezzo solido): la velocità degli impulsi decresce, all'aumentare del contenuto di umidità. Brevi impulsi di vibrazione sono generati da un trasduttore elettroacustico (emettitore) a contatto con la superficie dell'elemento investigato. Le onde (longitudinali o trasversali), dopo aver viaggiato attraverso il materiale vengono registrate da uno o più trasduttori (ricevitori) posizionati nella parte opposta o sulla stessa superficie dell'elemento, in base alla modalità di acquisizione dei dati. La vibrazione viene quindi convertita in un segnale elettrico, opportunamente amplificato e visualizzato su un oscilloscopio CRT (Cathode Ray Tube). L'elaborazione dei dati consiste nella misurazione del tempo e nel calcolo della velocità di attraversamento dell'impulso dato dalla muratura, per valutarne la compattezza, lo spessore, il modulo elastico e/o la profondità di eventuali lesioni.

Le prove sono eseguite per trasmissione: diretta (trasmettitore e ricevitore sono posti su superfici opposte ma sullo stesso asse, così che la direzione dell'onda sia ortogonale al piano di prova e ricezione); semi-diretta (trasmettitore e ricevitore sono posti su superfici opposte ma a quote diverse o su superfici adiacenti); superficiale o indiretta (trasmettitore e ricevitore posizionati sulla stessa superficie e le misure sono prese lungo una linea retta, verticale, orizzontale o diagonale).

### 2.2.7 DTS

La tecnica Distributed Temperature Sensing (DTS) [45], [66] permette di rilevare la distribuzione di temperatura ed il relativo contenuto di umidità grazie all'utilizzo di una fibra ottica ad alta precisione, mediante utilizzo dello scattering. Quando un raggio di luce si propaga lungo un cavo in fibra ottica, una parte di energia viene retro-diffusa attraverso il cavo, poi raccolta da una unità di controllo per quantificare la sua intensità e il tempo trascorso tra emissione e raccolta.

La tecnica DTS può essere utilizzata in modalità passiva o attiva. Nella prima, il cambiamento di temperatura misurato è dovuto alla variazione spontanea delle condizioni di temperatura nel mezzo che circonda il cavo (calore specifico, conduttività termica). In DTS attivo, il cavo in fibra ottica contiene un filo elettrico che viene riscaldato applicando un impulso di corrente elettrica e viene quindi misurata la variazione di temperatura risultante, determinando le proprietà termiche e il contenuto di umidità nel mezzo investigato.



### **3. Sistemi di trattamento**

*Nei capitoli precedenti sono stati analizzati i metodi di monitoraggio diffusi ed utilizzati in commercio per la verifica della presenza di umidità da risalita capillare, sia in ambito scientifico per scopi di ricerca, sia da parte di professionisti per la diagnostica del costruito. In seguito all'identificazione del problema, è necessario provvedere alla pianificazione degli interventi da eseguire per la conservazione del patrimonio edilizio.*

*In questo capitolo si vuole quindi analizzare quali sono, e sono stati, i metodi più utilizzati per ovviare al fenomeno della risalita capillare. Negli anni sono molti gli studi che hanno affrontato il tema della risoluzione dei problemi derivanti dalla risalita capillare, utilizzando tecniche di vario genere, dalla ricerca della limitazione della risalita mantenendo l'acqua nel terreno, all'aumento dell'evaporazione nei muri. Sono state quindi identificate quattro macrocategorie di sistemi di trattamento: riduzione della capacità di assorbimento della muratura, aumento della capacità di evaporazione della muratura, allontanamento fisico dell'acqua e sistemi elettrofisici.*

Per ritardare o rallentare i processi di degrado delle fabbriche edilizie dovuti all'acqua, nel tempo si sono sviluppate una serie di tecniche con lo scopo di interrompere o limitare la propagazione dell'umidità all'interno della muratura del 20-50%, dei materiali di rivestimento e degli altri componenti [1], [31], [67], [68].

Le tecniche attualmente in uso sono classificabili come in Tabella 8 [41]:

Tabella 8. Classificazione tecniche di trattamento.

<b>Damp-proof Course</b>	Metodo Koch
	Barriera chimica / meccanica
<b>Sistemi evaporativi</b>	Sifoni di Knapen
	Ventilazione meccanica
	Intonaco macro-poroso
<b>Sistemi elettrofisici</b>	Elettrosmosi attiva / passiva
	Elettrosmosi-foresi
	Neutralizzazione di carica
<b>Sistemi di allontanamento H<sub>2</sub>O</b>	Intercapedine
	Contropareti
	Drenaggio

Attualmente manca una normativa relativamente il collaudo di un intervento di risanamento; perciò, rimane sempre il dubbio sull'efficacia dello stesso, in quanto: (i) le soluzioni non sono spesso correlate da informazioni di carattere tecnico come dati quantitativi confrontabili; (ii) il monitoraggio a lungo termine, necessario per verificare la validità del sistema, è spesso interrotto dopo poco tempo; (iii) più sistemi differenti vengono applicati in uno stesso caso studio, rendendo difficoltosa la comprensione di quale metodo abbia effettivamente agito, o se derivi dalla concomitanza di più interventi. L'unico modo per giudicare l'efficacia di una determinata procedura è valutare la compatibilità dell'intervento in relazione ai materiali edili ed alle strutture, il grado di invasività, il livello di reversibilità, i tempi di esecuzione, i costi, la durata nel tempo e le opere di manutenzione richieste.

Di fondamentale importanza per l'esecuzione di corretti interventi di manutenzione è la conoscenza del materiale considerato e del suo stato di conservazione, in quanto i fenomeni di degrado possono derivare sia da fattori esterni (clima e microclima) sia interni (composizione chimica e mineralogica, caratteristiche fisiche, proprietà meccaniche). Tuttavia, prima di eseguire qualsiasi tipo di intervento è necessario provvedere ad un'azione di pre-consolidamento (nel caso di avanzato stato di degrado, per migliorare la coesione del materiale alterato con il substrato sano) e successiva pulizia del paramento murario con eliminazione dei sali, mediante lavaggio con acqua (semplice, sottovuoto, a depressione), sabbiatura, pulizia chimica o impacchi assorbenti.

In Appendice B si trovano una serie di applicazioni di sistemi di trattamento su casi reali o sperimentazioni in laboratorio (materiali e/o modelli di muratura).

### 3.1 Riduzione della capacità di assorbimento della muratura (DPC – Damp-Proof Course)

#### 3.1.1 Metodo di Koch

La tecnica [23], [31], [41], ideata alla fine del XIX secolo, consiste nella riduzione della sezione di contatto tra la muratura e il terreno, mediante demolizioni e rimozione di materiale costituente la muratura, per la formazione di piccoli archi di breccia (Figura 7), con lo scopo di velocizzare i tempi di evaporazione e limitare la sezione di muratura disponibile per il flusso di risalita dell'acqua. Tale sistema è impiegabile solo su limitate parti di edifici perché alterano la statica degli stessi.

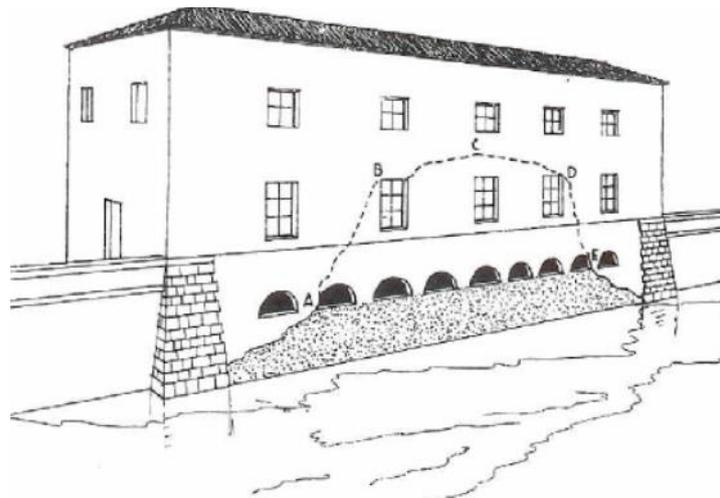


Figura 7. Schema metodo di Koch [23].

#### 3.1.2 Barriera meccanica

L'intervento meccanico prevede di effettuare un taglio netto del muro a circa 10-20 cm dalla base (per un settore non superiore ad 80 cm) e di applicare una lamina impermeabile in materiale plastico o metallico con buona resistenza termica e adeguata resistenza a compressione. Tale opera consente di ridurre l'area di assorbimento della muratura e creare una barriera continua orizzontale (Figura 8).



Figura 8. Esempi di barriera meccanica (a sinistra Venezia, a destra Belgio)[69].

Esistono differenti barriere di tipo meccanico, come l'antica sostituzione dei mattoni porosi e/o danneggiati con materiale anti-capillare e non ossidabile, mediante la tecnica "scuci-cuci" [70]. Questo intervento spesso avveniva utilizzando materiali non completamente compatibili con l'esistente: infatti, i mattoni industriali di più recente fattura hanno caratteristiche chimico-fisiche diverse, nonché presentano una quantità differente di Sali al loro interno; la malta di calce ha componenti cementizie che consentono una facile lavorabilità, maggior velocità di presa e resistenza meccanica, ma presenta un contenuto di Sali maggiore al suo interno, a differenza della calce aerea utilizzata in antichità, realizzata con sabbia di campo/fiume.

Il metodo dei fori tangenti (metodo Massari) ha riproposto la tecnica appena descritta ma con la fresatura del muro mediante carotaggi continui (lotti di circa 40-150 cm, Ø 3.5 cm e interasse tra i fori < 3 cm) ed il riempimento con malta siliconica o resina idrorepellente (con buona resistenza a compressione e chimicamente stabile all'acqua). L'evoluzione del metodo Massari prevede di eseguire tagli con sega o con filo diamantato (per pareti di notevole spessore), ed il successivo inserimento di fogli impermeabili (PVC o piombo) dello spessore di 1-20 mm. Infine, un altro metodo prevede l'inserimento forzato di una lamiera ondulata in acciaio con martello pneumatico, di spessore 1.5-2 mm e larghezza 30-40 cm.

Questo tipo di intervento è inapplicabile nelle zone sismiche o a rischio eventi idrogeologici, perché può compromettere la stabilità della struttura degli edifici ed alterare la distribuzione dei carichi, provocando uno slittamento relativo tra le due porzioni di muratura. È inoltre da evitare negli edifici di interesse storico-culturale, in quanto il taglio può lasciare uno strato visibile nella muratura alterandone il valore estetico [14], [69], [71], [72].

### 3.1.3 Barriera chimica

La barriera chimica prevede di creare una barriera orizzontale idrorepellente mediante la perforazione della muratura ad un'altezza di circa 15-20 cm dalla base, con interasse tra i fori di 10-15 cm ed una profondità pari a circa  $\frac{3}{4}$  dello spessore del muro (Figura 9). I fori sono realizzati con un'angolazione di 30-45° nel caso di inserimento di prodotti liquidi, o orizzontalmente per l'inserimento di prodotti viscosi. L'applicazione del composto chimico idrorepellente a base siliconica con solvente a base acquosa od emulsionata in acqua può avvenire mediante impregnazione (senza pressione o con sola pressione idrostatica) o iniezione (con pressione superiore a quella atmosferica, compresa tra 0.5-1.5 atm per mezzo di pompe), allo scopo di sigillare in modo diffuso pori e capillari nel materiale da costruzione senza limitare l'evaporazione nella parte superiore della muratura.

I prodotti attualmente utilizzati sono resine epossidiche, silicati ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  o  $\text{K}_2\text{SiO}_3$ ), silani, siliconi, siliconati, silossani, cemento, poliuretano e prodotti bituminosi, utilizzati in diverse percentuali a seconda del grado di profondità che il materiale impregnante deve raggiungere [31], [69], [72], [73], [74], [75], [76]. Le caratteristiche che li rendono pregiati per lo scopo sono:

- Ottime caratteristiche meccaniche di resistenza a trazione e compressione;
- Stabilità e resistenza all'invecchiamento;
- Assenza di ritiro dopo la fase di indurimento;
- Elevata adesione ai materiali da costruzione e buona compatibilità ai supporti umidi;

- Elevata resistenza chimica all'attacco di soluzioni acquose acide e basiche.



Figura 9. Esempio di foratura alla base della muratura per eseguire iniezione/impregnazione di prodotti chimici.

## 3.2 Sistemi evaporativi

### 3.2.1 Sifoni di Knapen

Nella muratura vengono praticati dei fori a quota 15-30 cm dal piano di campagna inclinati di 15°, con interasse 20-50 cm e profondità pari a  $\frac{2}{3}$  dello spessore del muro, e successivamente inseriti tubi o cartucce di ceramica, plastica o metallo (in origine di terracotta) di circa 3 cm di diametro e 5-10 cm di lunghezza, di forma triangolare, circolare o pentagonale (Figura 10). Tali cartucce, denominate "sifoni atmosferici", inserite inclinate verso il basso (25-30°) dalla superficie esterna della parete, generano un ricambio d'aria interno che incrementa l'evaporazione e permette l'asciugatura del muro. Il funzionamento teorico di questi elementi avviene solamente in alcune particolari condizioni termo-igrometriche ambientali, non sempre presenti nella realtà: il principio si basa sul fatto che l'aria umida abbia una densità minore dell'aria secca, quindi l'aria umida proveniente dall'interno della parete viene liberata facilitando l'asciugatura delle pareti [69].

Tuttavia, varie osservazioni, hanno dimostrato come l'applicazione dei sifoni non comporti alcun effetto rilevante sulla riduzione del contenuto di umidità nella muratura e un aumento di Sali attorno al sifone [29].

### 3.2.2 Ventilazione meccanica con controllo periferico

Questa tecnica, preferibile nel caso in cui il muro di fondazione sia ad una quota superiore rispetto alla quota della falda freatica, è considerata una delle tecniche più efficienti per le murature storiche. Il sistema di ventilazione realizzato con tubi in cemento di diametro ~20 cm circa, viene installato alla base della muratura e collegato ad un dispositivo di ventilazione meccanica regolabile. Il sistema avrà meno efficienza all'aumentare dello spessore del muro.

Tale metodo, di difficile applicazione nel caso di edifici adiacenti, non risolve il problema di risalita ma riduce l'altezza di risalita dell'umidità per un 30-50% grazie all'aumento di evaporazione [1], [31].



Figura 10. Esempi di sifoni di Knapen [69].

### 3.2.3 Intonaco macro-poroso

Applicazione di un rivestimento in malta cementizia, malta bastarda, calce aerea o calce idraulica con additivi a porosità controllata (fino a 45%vol) sulle superfici esterne (mono o multistrato) ad alto spessore (3-5 cm), per favorire l'evaporazione interna e l'aspirazione capillare, impedendo la cristallizzazione esterna di Sali. L'applicazione di silani sulla superficie dell'intonaco lo trasforma in un materiale idrofobo, capace di impedire l'assorbimento di acqua senza alterare le proprietà di trasmissione del vapore. Gli inerti di cui sono composti gli intonaci sono: tradizionali (silicati, carbonati, dolomiti) di media traspirabilità e buona resistenza meccanica; leggeri (perlite, argilla espansa, loppa granulata, vetro estruso), con ottima traspirabilità e scarsa resistenza meccanica (resistenza a compressione pari a 2-8 N/mm<sup>2</sup>).

Tale intonaco permette inoltre di limitare il degrado arrecato dai microrganismi e dalle popolazioni algali. Le performance sono relazionate ad una serie di parametri come asciugatura del substrato, spessore dell'intonaco, contenuto di umidità nell'aria, condizioni di evaporazione e presenza di additivi nell'intonaco. Per garantire la sua efficacia dev'essere sostituito ogni 10-15 anni [31], [69]. Tali sistemi non operano autonomamente per la deumidificazione delle murature, ma supportano lo smaltimento della stessa tramite evaporazione.

Le caratteristiche prestazionali richieste alle malte per intonaci macro-porosi e da risanamento sono normate dalla UNI EN 998-1[77] e UNI EN 998-2[78].

Tabella 9. Caratteristiche chimico-fisiche degli intonaci da risanamento (WTA 02-09-2004).

Caratteristica	Unità di misura	Valore
Densità	kg/m <sup>3</sup>	< 1400
Resistenza a compressione	N/mm <sup>2</sup>	1.5 – 5
Assorbimento d'acqua (24 h)	kg/m <sup>2</sup>	0.3
Resistenza alla diffusione del vapore	-	< 12
Porosità	%	> 40

## 3.3 Sistemi elettrofisici

### 3.3.1 Elettrosmosi attiva

L'elettrosmosi è un fenomeno che descrive il movimento di un liquido rispetto a una superficie solida carica elettricamente, sotto l'azione di un campo elettrico quando questo è applicato attraverso un sistema (materiale poroso). La teoria, studiata per la prima volta da Reuss (1809) e

poi da Helmholtz (1879), ha introdotto il principio del “doppio strato elettrico” su una superficie carica; nel caso in esame si tratta dell’interfaccia liquido-solido (§ 1.2.2.2). I dipoli dell’acqua debolmente legati, perché lontani dalla parete carica, possono essere spostati fornendo energia elettrica mediante l’applicazione di un potenziale elettrostatico; tale tecnica è nota come elettrosmosi “attiva”.

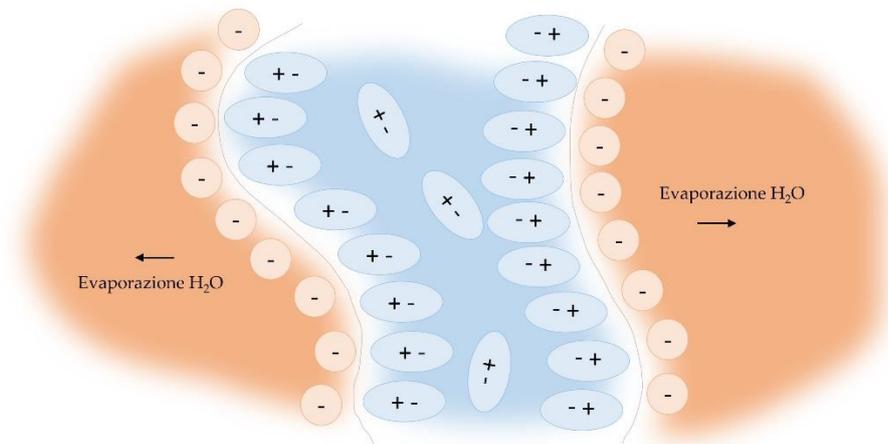


Figura 11. Schema di capillare nella muratura e movimento dei dipoli d'acqua all'interno.

L’elettrosmosi “attiva” agisce sulla differenza di potenziale che si viene a creare nella muratura per il fenomeno della capillarità. Mediante l’inserimento di elettrodi collegati ad un generatore di tensione (induttore), anodi nella muratura in alto (zona di evaporazione e di massima risalita dell’umidità, circa 70-80 cm dal suolo) e catodi in basso (fondazione o terreno), si crea una differenza di potenziale elettrico maggiore del campo elettrico naturale. Questo fenomeno, se mantenuto costantemente attivo determina l’inversione del movimento acqueo nei capillari, grazie alla generazione di deboli onde elettromagnetiche in un range di frequenze innocue per il corpo umano. Il trasporto di acqua nei capillari dipende dall’intensità del campo elettrico applicato, dalle proprietà fisiche del materiale poroso e del fluido che lo occupa. Il sistema, quindi, agisce sulla struttura molecolare dell’acqua, limitandone la risalita nelle murature e spingendo i dipoli dell’acqua verso il suolo; il flusso elettrosmotico andrà quindi ad interrompere il doppio strato elettrico che si forma all’interfaccia tra superficie solida e fluido [33], [79], [80]. Il concetto è quello di creare artificialmente un campo elettrico in cui il polo negativo è situato nel terreno ed il polo positivo nel muro. Nelle murature in elevazione a cui viene applicato il sistema, l’acqua tenderà a spostarsi verso il polo negativo per l’effetto delle forze elettro-osmotiche, per cui il liquido tende ad andare verso il terreno e non risale i pori della muratura. La tensione dell’impianto che genera corrente elettrica è compresa tra 2 e 6 V, la corrente varia da 10 mA/ml all’inizio del processo fino a scendere gradualmente a 0.15 mA/ml, e l’energia richiesta per favorire l’asciugatura della muratura è di circa 1 kWh per kg di acqua [29].

### 3.3.2 Elettrosmosi passiva

L’elettrosmosi “passiva” è caratterizzata dall’assenza di sviluppo di campi elettromagnetici artificiali, ma da una differenza di potenziale elettrico tra terra e muratura dell’ordine di circa

300-400 mV [29]. Esistono diverse applicazioni di questa tecnologia, con il posizionamento di corpi opportunamente caricati nella muratura (rete cablata, aste metalliche) oppure mediante l'applicazione di dispositivi ad armonizzazione di fase.

Nel caso di aste metalliche, si inseriscono nella muratura in obliquo (profondità 50 cm, Ø 3 cm) con interasse 50-80 cm (in acciaio dolce al carbonio rivestite da una doppia guaina di neoprene vulcanizzato o rame debolmente legato) chimicamente ed elettricamente isolate, che vanno dalla fondazione (zona di risalita) alla zona di evaporazione. I corpi si polarizzano per induzione elettrostatica, facendo diventare l'insieme muratura-aste neutro e annullando la differenza di potenziale. Le barre polarizzate tendono quindi a fermare la risalita capillare dell'acqua comportandosi da dipoli che mantengono separate le cariche positive (cationi) e negative (anioni), bloccando le molecole d'acqua verso il basso.

La tecnologia ad armonizzazione di fase [81] utilizza invece campi energetici naturali per portare in equilibrio la differenza di potenziale presente nella muratura, mediante la modifica delle aggregazioni molecolari dell'acqua.

L'acqua si esaurisce progressivamente nel tempo, per forza di gravità nella zona inferiore della muratura (campi energetici naturali) e per evaporazione nella zona superiore della muratura, mentre le eventuali efflorescenze dovranno essere asportate meccanicamente, fisicamente e/o chimicamente [24] [82].

### 3.3.3 Elettrosmosi-foresi

Inversamente a quanto succede con l'elettrosmosi, se il liquido rimane fermo e si muove solamente il solido (particella in sospensione) si parla di elettroforesi [18], [41]. Si utilizza l'umidità defluente come mezzo di trasporto per sostanze sigillanti e consolidanti in soluzione, indotta da tensione elettrica. Nella muratura si esegue una scanalatura (profondità 1-2 cm) per tutta l'estensione della parete da trattare, vengono poi inserite delle sonde in lega a base di rame collegate tra loro (introduzione campo elettrico artificiale come nell'elettrosmosi attiva), e parallelamente viene iniettato un composto in soluzione acquosa contenente particelle solide con carica positiva; queste defluiscono verso il polo negativo ed esercitano un'azione sigillante e idrofobizzante sui pori a sezione ridotta, con funzione di consolidamento del muro. In seguito, una rasatura consentirà di proteggere la muratura (efflorescenze, agenti organici, umidità ambientale) e rendere invisibile l'installazione.

### 3.3.4 Tecnologia a neutralizzazione di carica (CNT)

La tecnologia [17], [43], [64] si basa sul principio dell'elettrocapillarità (*electrowetting*<sup>10</sup>), in cui il fenomeno della capillarità è legato alla variazione di tensione superficiale tra un liquido conduttore (soluzione acquosa salina) e una superficie solida (parete, caratterizzata da contenuto siliceo), sotto l'azione di un potenziale elettrico esterno. L'applicazione di un campo elettromagnetico impulsivo a bassa intensità opportunamente modulato (con raggio di azione

---

<sup>10</sup> L'*electrowetting* (o elettrocapillarità) [83] indica la capacità di una superficie idrofobica di modificare le sue proprietà bagnanti (variazione angolo solido-elettrolita) al momento dell'applicazione di un campo elettrico (differenza di potenziale).

sferico fino a 15 m e in un determinato range di frequenze) direttamente sulla molecola di acqua, determina una variazione della tensione superficiale (ossia dell'angolo di contatto) all'interfaccia solido-liquido, neutralizzando il comportamento del liquido e impendendone la risalita all'interno della muratura. La CNT garantisce in modo permanente lo stato di equilibrio della struttura, indipendentemente dal materiale costruttivo e l'acqua in eccesso, non essendo più alimentata dal fenomeno di risalita, tende a smaltirsi naturalmente per evaporazione. Il processo di asciugatura richiede almeno due anni.

### **3.4 Sistemi di "allontanamento" dell'acqua dalla parete**

#### **3.4.1 Intercapedine alla base della muratura**

L'intercapedine, che può essere a trincea coperta o scoperta, consiste nella realizzazione di uno scavo (larghezza 40-50 cm) adiacente la base della muratura perimetrale a contatto con terreni impregnati d'acqua ed il successivo inserimento di elementi in calcestruzzo armato, per formare canalizzazioni verticali allo scopo di favorire la circolazione dell'aria. La trincea può rimanere vuota, riempita di ghiaia o altro materiale.

Tale tecnica è adatta per edifici di nuova costruzione, ma nel caso di strutture esistenti e/o edifici storici la realizzazione diventa più difficoltosa o quasi impossibile; in quest'ultimo caso, se applicata, è consigliato il riempimento della stessa o la predisposizione di armatura [41].

#### **3.4.2 Contropareti**

Il contromuro viene realizzato a 5-10 cm dalla parete interna umida, posato con mattoni a coltello su uno strato isolante. Sono classificabili in tre tipologie: camera d'aria completamente chiusa, camera d'aria comunicante con l'esterno (mediante aeratori che assicurano una ventilazione naturale) e camera d'aria comunicante con l'esterno in alto e con l'interno in basso (con estrazione forzata dell'aria umida). In alcuni casi, fra muro e controparete può essere inserito un pannello coibente o una impermeabilizzazione; in quest'ultimo caso, oltre a bloccare l'evaporazione, può però anche limitare la traspirabilità della struttura.

#### **3.4.3 Drenaggio**

Il drenaggio consiste nell'eseguire uno scavo (trincea) nel terreno vicino al muro perimetrale, con profondità pari alla base della fondazione. La trincea verrà riempita a secco con ciottoli in modo da realizzare un piano con pendenza 2-4%, per favorire il deflusso delle acque. Alla base dello scavo si posiziona un tubo drenante che raccoglie l'acqua intercettata e la convoglia ad uno scarico controllato (pozzo perdente o fognatura). Per impedire l'imbibizione del terreno compresa tra scavo e muro, dovuta all'acqua piovana o da perdite di tipo accidentale, è necessario creare un marciapiede lungo il perimetro dell'edificio con adeguate pendenze, materiali a granulometria diversificata e l'inserimento di un foglio di tessuto non tessuto [41].

Tale intervento può essere eseguito solamente per le pareti perimetrali, ma non è efficace né per fenomeni di umidità in locali interni né per quanto riguarda la risoluzione della risalita capillare attraverso le fondazioni.

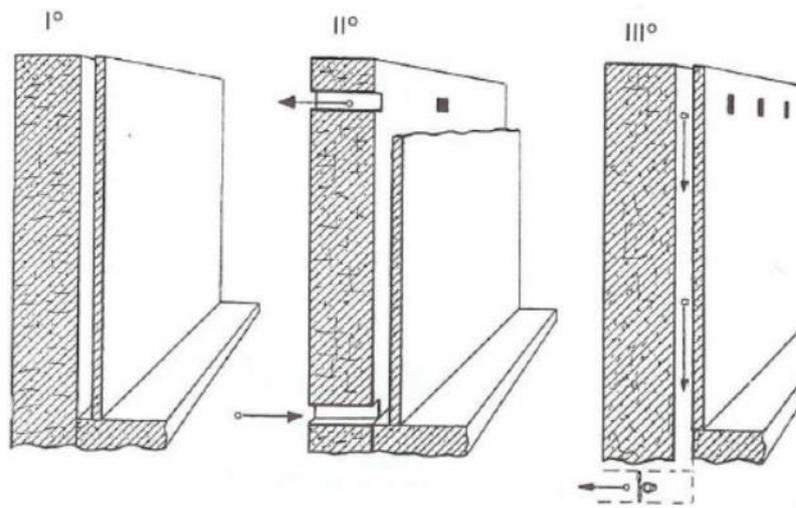


Figura 12. Schema contromuro: I° camera d'aria chiusa, II° camera d'aria ventilata verso l'esterno, III° camera d'aria ventilata verso l'interno e l'esterno con estrazione forzata [23].

#### **4. I materiali delle costruzioni storiche Veneziane**

*Nella città lagunare le costruzioni storiche sono state realizzate con pochi materiali, tra cui i principali sono mattone, malta, intonaco e pietra. Su questi materiali vari studi sono stati effettuati negli ultimi 30-40 anni, al fine di individuarne le caratteristiche fisico-chimiche-mineralogiche, e a partire da queste, riuscire a identificare quali siano gli agenti che ne provocano il degrado e proporre delle soluzioni di manutenzione e conservazione.*

*A partire da una approfondita indagine bibliografica si sono riorganizzate le informazioni disponibili in un unico database, geo-referenziato, per avere una lettura chiara e immediata dei dati a disposizione. Si è poi proceduto, come mostrato nel § 6 (Caratterizzazione dei materiali da costruzione Veneziani), a integrare questi parametri con una caratterizzazione di laboratorio, mediante l'utilizzo di campioni attuali di materiali che riproducono le caratteristiche tipiche del contesto lagunare.*

*Si è così contribuito a sanare parte delle lacune di conoscenza rispetto ai dati quantitativi necessari per una completa caratterizzazione dei diversi materiali costruttivi con l'obiettivo futuro di poter completare il lavoro e ottenere una documentazione completa dei materiali del costruito veneziano.*

## 4.1 I materiali del costruito veneziano

Nella città lagunare sono riscontrabili tre macrocategorie di materiali costruttivi, modificatisi nei secoli a seconda della funzione cui dovevano svolgere: mattone, malta/intonaco e pietre.

Le prime abitazioni veneziane erano realizzate in legno, ma in seguito agli incendi dell'XI-XII secolo si passò gradualmente alla realizzazione di edifici in muratura con finiture a vista, tra il XIII e XV secolo [70], [84]. Le strutture murarie sono riconducibili alle seguenti tecnologie:

- muri di facciata esterna/interna in pietra e mattone (discontinui);
- muri di spina;
- muri interni trasversali ai muri di spina;
- pareti di partizione interna a struttura lignea.

Sono usuali le murature con spessore di tre teste (circa 40 cm) alla base, e due teste (25-30 cm) ai piani alti, per ridurre i carichi gravanti sulle fondazioni. La pietra d'Istria inserita orizzontalmente alla base della muratura aveva lo scopo di evitare la bagnatura della muratura da parte dell'acqua di laguna, ma con il progressivo innalzamento del livello del mare, il livello in cui era stata posizionata non ha più soddisfatto tali requisiti. Il moto ondoso, infatti, provoca processi di erosione e asportazione del materiale; i cicli di bagna-asciuga determinano uno stress fisico nella struttura porosa della muratura, cristallizzazione e conseguente disgregazione provocata dai Sali. Il processo ha inizio dai giunti di malta e successivamente anche negli strati più interni, con conseguente disgregazione della struttura.

### 4.1.1 Mattone

Nel contesto veneziano Medievale, la realizzazione dei mattoni di argilla [85] avveniva utilizzando sia fornaci presenti nel territorio veneziano (S. Antonino e isola della Giudecca), con argilla proveniente dai bordi lagunari della terraferma, sia fornaci di terraferma (Altino e Padova), con argilla proveniente dalle "rive del fiume Brenta fra Padova e Venezia"<sup>11</sup>, in quanto l'approvvigionamento, l'utilizzo delle risorse e il trasporto dei materiali avevano costi elevati in città. Alcune volte erano utilizzati anche mattoni di reimpiego dei territori circostanti (mattoni romani, fino al XIII secolo circa), in particolare per stabilizzare e consolidare gli edifici.



Figura 13. Esempi di murature Veneziane.

<sup>11</sup> Citazione di Vincenzo Scamozzi.

Negli edifici lagunari sono distinguibili diverse tipologie di mattoni, in base alla tipologia di argilla utilizzata e quindi dalla colorazione ottenuta dall'impasto, dalla lavorazione e cottura, dimensioni e forma. Si possono distinguere mattoni leggeri e porosi, di colore chiaro, facili da tagliare e aderenti alla malta, e mattoni più resistenti derivanti da una cottura prolungata dell'impasto adatti alle fondazioni subacquee, perché la superficie vetrosa e meno porosa li rende resistenti alla salsedine. Da queste informazioni sul mattone e dalla loro posa in opera, ossia la disposizione nei corsi, la tipologia di malta utilizzata, la finitura superficiale (se presente), l'altezza e la lavorazione dei giunti di malta, è possibile risalire al periodo storico costruttivo della fabbrica. Infatti, intorno al XII-XIV secolo le murature erano realizzate con mattoni di spoglio dalle forme e dimensioni irregolari, per cui è facilmente riscontrabile nelle fabbriche un notevole spessore dei giunti ("giunto spesso") di tradizione bizantina con ascendenza tardo-romana, funzionale alla regolarizzazione della posa in opera dei laterizi, raggiungendo in alcuni casi spessori prossimi a quelli del laterizio (> 2 cm); in tal caso la malta ha un ruolo strutturale preponderante. Nel periodo gotico (XIV-XVI secolo) il giunto rappresenta solo un sesto del volume totale della muratura, in quanto i mattoni di grandi dimensioni erano accostati ad un giunto sottile (< 1 cm), successivamente stilato e dipinto ad imitare il mattone stesso [86]. Solo nelle murature moderne il giunto di malta ha uno spessore di ~ 1 cm.

Nelle varie epoche, anche i mattoni hanno subito una trasformazione notevole in termini di dimensioni e forma, principalmente legata a ragioni economiche, ossia al risparmio nell'utilizzo delle materie prime nei periodi più poveri (Tabella 10) [87]. Molto spesso la combinazione delle dimensioni dipendeva anche dalla necessità di adattarsi a fabbriche esistenti in cui era necessaria la combinazione con altri elementi, interstizi o forme irregolari. Nel corso del XII secolo inizia l'abbandono dell'utilizzo di mattoni di reimpiego e l'affermazione di un tipo mattone veneziano piccolo e tozzo, denominato "*altinella*" (Figura 14, il cui nome ha origine dalla città di Altino) [88], generalmente considerato come il mattone di transizione dalla struttura verticale lignea alla struttura muraria. La sua diffusione deriva dalla necessità di interporre un elemento laterizio alle strutture lignee verticali, come tamponamento, per ridurre il rischio di propagazione incendi; le dimensioni ridotte ne consentono una buona adattabilità a interstizi e forme irregolari, con possibilità di sostituzione parziale della struttura. Una volta venuta meno la funzione di transizione di elemento costruttivo da parte dell'*altinella*, le dimensioni iniziano a mutare e diventare maggiori, dando origine al mattone gotico e successivamente rinascimentale. Il mattone gotico, di impasto giallo citrino-rosato, veniva impiegato principalmente nei fronti esterni dei palazzi privati, e solo in alcuni casi nell'edilizia pubblica (es. Scuola Grande di S. Giovanni Evangelista). La posa in opera avveniva mediante la stesura del giunto di malta con spessore limitato, per dare all'apparato una funzione estetico-decorativa. Verso il termine del XVI secolo, la manifestazione di intonaci a strato consistente determina la scomparsa di questa tipologia di laterizio, in quanto non contribuisce più alla fabbrica architettonicamente ma solo con funzioni costruttivo-strutturali. Le dimensioni degli elementi iniziano così a decrescere lentamente, poiché svolgono funzione di muratura perimetrale soprattutto per edifici destinati a case date in locazione.

In seguito alla dominazione austriaca della città nel 1815, è iniziata la normalizzazione delle dimensioni del mattone a 24 x 12 x 5 cm.

Tabella 10. Tipologia di mattoni diffusi nelle epoche Veneziane [84], [87].

Epoca [secolo]	Tipologia	Lunghezza [cm]	Larghezza [cm]	Spessore [cm]
X-XII	Medievale	45-47	23	7-8
XII-XIV	Bizantino ("Altinella")	15.5-17.5	8	4-4.5
XIV-XVI	Gotico	26-30	12-15	6-7.5
XVI-XIX	Rinascimentale	26	13	6
Fino al XIX	Moderno UNI	25	12	5.5



Figura 14. Confronto tra altinelle di differente misura: gli elementi più grandi (lunghezza 20 cm) sono del XIV-XV secolo, gli elementi di 15.5-16 cm sono di probabilmente del XIII-XIV secolo.

La materia prima del mattone, ed in generale dei materiali ceramici, è l'argilla: primaria molto rara in natura, di colore bianco e alla quale appartiene il caolino; o argilla estratta in sedimenti colorati (giallo, grigio, rosa, rosso) molto più diffusa in natura. Una volta estratta deve essere macinata, stagionata e lavorata per raggiungere un certo grado di plasticità e purezza (giusto rapporto tra scheletro e minerali argillosi), ottenibili mediante interventi di macerazione o manipolazione, con l'aggiunta graduale di acqua per eliminare le bolle d'aria che ne riducono la plasticità. La foggatura, ossia la formazione degli elementi da cuocere, avviene prima con stampi di legno, e successivamente mediante estrusione.

Il mattone verrà successivamente cotto nelle fornaci a temperature comprese tra i 900°C e 1000°C [89], subendo trasformazioni irreversibili, perdendo la sua plasticità ed ottenendo un buon grado di compattezza e resistenza a compressione [87]. Dopo l'estrazione dalla fornace, il mattone dev'essere levigato e pulito per ottenere una grana fine e uniforme. La cottura determina una distribuzione quasi uniforme e unidimensionale dei pori, determinando una capacità igroscopica limitata ed elevata capacità di assorbimento capillare. La quantità d'acqua che può contenere una struttura dal punto di vista igienico; per le murature in laterizio comune dev'essere  $\leq 3\%$  [90].

#### 4.1.2 Malta

La malta è un conglomerato costituito da una miscela di legante (cemento e/o calce), acqua, inerti fini (es. sabbia di natura compatta e non friabile, derivate da rocce silicee o granitiche, con distribuzione granulometrica compresa tra 0.125-1.00 mm) ed eventuali additivi, in proporzioni tali da assicurare lavorabilità all'impasto bagnato e resistenza meccanica allo stato asciutto. In base al tipo di indurimento le malte si possono distinguere in aeree (induriscono e fanno presa solo se a contatto con l'aria) o idrauliche (danno luogo alle reazioni di indurimento anche se poste in ambienti umidi o in presenza di acqua, grazie alla presenza di silicati e alluminati di calcio –  $\text{Ca}_2\text{SiO}_4$  e  $\text{CaOAl}_2\text{O}_3$ ). Le malte idrauliche hanno una elevata resistenza alle azioni meccaniche e sono durabili nel tempo.

Per la produzione delle malte aeree grasse<sup>12</sup> dette "grassello" il processo ha inizio con la cottura di pietre calcaree a 900-950°C e la trasformazione del carbonato di calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) in ossido di calcio ( $\text{CaO}$ ) detto "calce viva", e anidride carbonica  $\text{CO}_2$ , mediante reazione di decomposizione endotermica [91]. Il successivo processo di spegnimento con acqua (reazione esotermica a 180-200°C) permette di ottenere l'idrossido di calcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ), detto "calce spenta o idrata" (18) con un conseguente notevole aumento di volume. Tale operazione è effettuata per evitare rigonfiamenti e disgregazione della malta durante la presa, ma richiede lunghi tempi di stagionatura in quanto molto lenta.



La calce spenta, allettata nella muratura e a contatto con l'anidride carbonica subisce il fenomeno di carbonatazione (presa aerea, (19)).



Figura 15. Esempi di applicazione di intonaco e malta tra i giunti della muratura, edifici Veneziani.

<sup>12</sup> La principale differenza tra calce "grassa" e "magra" la variazione di volume che avviene con la formazione della calce spenta e la purezza del calcare di partenza. Per malte grasse si intendono le malte generalmente di colore biancastro, confezionate con un rapporto, tra legante e aggregato, maggiore di 1:2 (in volume); il titolo di idrato  $\text{CaCO}_3$  dev'essere maggiore del 90% (più si avvicina al 100%, più la calce è pura), con conseguente elevato potere legante, brevi tempi di presa e aumento di volume di 3-3.5 volte. Nelle calci magre tale rapporto è < 1:3, con resa più bassa, di colore grigiastro e a pasta ruvida e aumento di volume inferiore al doppio.

Il principale tipo di malta diffusa a Venezia, era una miscela di calce e sabbia di origine lagunare [92], [93], definita malta aerea. A partire dal XV secolo, inizia a diffondersi l'utilizzo anche della malta lievemente idraulica, conosciuta con il nome di "calce Negra" o "calce Padovana"<sup>13</sup>, in relazione al suo colore (grigio) e la sua provenienza (colli Euganei), caratterizzata dalla presenza di calcari argillosi (10-20% di argilla). Per la messa in opera delle murature la calce doveva essere di tipo magro perché aumentava l'aderenza degli strati, mentre per la finitura a intonaco si utilizzava una calce grassa, perché di più facile lavorazione in quanto morbida. Tra gli inerti, oltre alla sabbia si utilizzava anche il vetro macinato derivante dalle fornaci di Murano ("*granzolo di vetro*"). I giunti tra i mattoni, di spessore variabile, potevano essere eseguiti a raso (per impedire all'acqua di ristagnarsi e infiltrarsi), in ritiro (per ottenere un effetto chiaro-scuro), a gocciolatoio (per favorire lo smaltimento dell'acqua), o a toro sporgente (per far risaltare il giunto) [94].

La malta assume una buona lavorabilità se la quantità di acqua è generosa; al contrario, se il quantitativo di acqua è ridotto, assume buone proprietà meccaniche. In ambienti molto umidi, come nel caso della città di Venezia, la stagionatura della malta con calce aerea è molto lenta. Per tale motivo, a partire dal XX secolo, la calce pura viene addizionata a componenti idraulici (pozzolana<sup>14</sup> di origine vulcanica o cemento) per aumentare la rapidità di presa anche in condizioni umide o per opere che devono resistere all'azione idraulica dell'acqua (ponti, dighe) anche di tipo salmastro [29], dando origine alla malta idraulica. Durante la Seconda Guerra Mondiale e nel dopoguerra (1950-1960), alla base di calce aerea vengono progressivamente aggiunti additivi per migliorare le caratteristiche idrauliche. In tempi più recenti hanno origine prodotti premiscelati, a cui è necessario solo aggiungere una determinata quantità di acqua per ottenere il prodotto finito.

#### 4.1.3 Intonaco

A Venezia l'intonaco ha sempre avuto una duplice funzione: estetico/decorativo (a partire dall'epoca gotica in cui i palazzi erano decorati a fresco con motivi floreali e/o fantastici, fino alle fabbriche rinascimentali con splendidi cicli di affreschi figurativi) e tecnico come protezione degli elementi di supporto sottostanti. In base al tipo di aggregato utilizzato, si possono classificare i principali tipi di intonaci lagunari (Figura 16): impasti a base di sabbia, impasti a base di cocciopesto e impasti a base di aggregato lapideo.

Il materiale legante per la quasi totalità degli intonaci è la calce aerea in forma di grassello stagionato, utilizzato fino alle fine del XIX secolo. Nel XV secolo, l'intonaco tradizionale era costituito dalla stessa miscela utilizzata nei giunti della muratura in calce e sabbia (rapporto 1:3), con spessori di 5-6 mm (mono-strato), in questo caso ottenendo una finitura liscia e uniforme a cui venivano aggiunti pigmenti policromi nel caso di affreschi. Nel centro urbano Veneziano era molto diffusa la tecnica "*regalzier*", ossia la pratica di voler far apparire la tessitura muraria sottostante, con il ridisegno di mattoni e malta. Le finiture superficiali, sia nel Medioevo che in tempi moderni, venivano stese a ferro e trattate con prodotti naturali (olio di lino, cera, sapone

---

<sup>13</sup> Definizione di Andrea Palladio.

<sup>14</sup> Pozzolana: roccia tufacea rosso-bruna, ad alto contenuto di silice, utilizzata fin dall'antichità come legante idraulico e quindi utilizzata per la realizzazione di malte che dovevano far presa sott'acqua.

damaschino, latte di calce, trementina), come protezione all'ambiente umido e alle intemperie ma anche con la capacità di evocare la finitura di pietre o marmi pregiati.

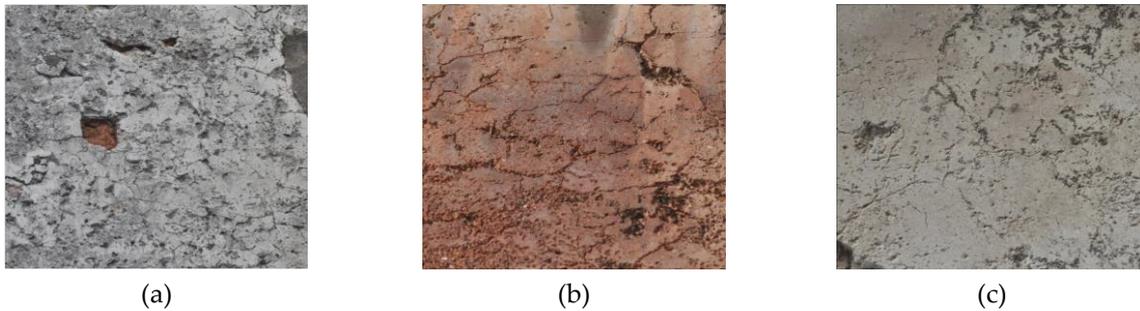


Figura 16. Intonaco tradizionale Veneziano: (a) calce-sabbia, (b) Cocciopesto, (c) Marmorino.

A partire dal XVI secolo si ha la diffusione del Cocciopesto, ottenuto dalla frantumazione di mattoni o tegole di laterizio, per ottenere una polvere a diversa granulometria come aggregato dell'impasto. L'applicazione avveniva come sovrapposizione di più strati in differenti combinazioni: la base era uno spessore sottile di calce e sabbia steso in due strati, e l'ultimo livello (strato finale) assumeva il colore del materiale aggregante scelto, ottenendo uno spessore totale di 12-15 mm [95]. In origine questo materiale era utilizzato soprattutto come rivestimento per proteggere i muri dall'umidità, perché caratterizzato da elevate caratteristiche di idraulicità e resistenza, per la combinazione fra idrossido di calcio e silico-alluminati dell'argilla cotta, nonché incombustibilità e refrattarietà. In seguito, a partire dall'inizio del Settecento si limita sempre più l'utilizzo del Cocciopesto a vista ma solamente come sottofondo ad altri tipi di finiture, probabilmente perché meno durevole nel tempo, caratteristica correlata alla elevata porosità del composto (fortemente traspirante e assorbente), costituito da frammenti di cotto anche di grandi dimensioni.

Altra tipologia di intonaco diffuso è il Marmorino, un intonaco biancastro (definito "stucco" o "terrazzetto" fino al XVIII secolo) composto da calce e aggregato lapideo (marmo carbonatici  $\text{CaCO}_3$  come frammenti di pietra d'Istria che conferisce la tonalità bianca, e/o marmi toscani, pietre di cava friulane/veronesi/bresciane con toni di giallo, verde, nero e rosa) che dava l'illusione di una superficie in vero marmo [91]. Nell'architettura Veneziana era un intonaco molto diffuso, per le sue garanzie di durata nel tempo, sia per la consistenza del materiale stesso (bassa porosità, resistenza alla salsedine) che per la buona conservazione cromatica [96]. Questo avviene grazie alla sua natura compositiva, ossia l'utilizzo di polvere di marmo che a contatto con i silicati del mattone e i carbonati della malta crea un legante tra questi due materiali, mantenendone inalterati i parametri chimico-fisici. La stesura può avvenire secondo quattro tipi di stratigrafia, ottenendo spessori variabili tra i 18 e 22 mm: (i) monostrato in due mani, la prima grossa e la seconda con lucidatura finale a ferro più fine; (ii) sottofondo in sabbia; (iii) sottofondo

in cocciopesto; (iv) sottofondo in rinzaffo<sup>15</sup> di cocciopesto e arriccio<sup>16</sup> in sabbia. La notevole variabilità dello spessore finale è correlata principalmente allo spessore degli strati di aderenza al supporto, realizzati più o meno consistenti per compensare le irregolarità della muratura e garantire quindi la planarità della superficie. La lucidatura finale permette di ottenere una superficie omogenea con aspetto traslucide.

#### 4.1.4 Pietra

Venezia è una delle città più ricche di marmi e pietre, usate nei secoli sia come materiale da costruzione che come ornamento, importate dall'Oriente e da molti siti sparsi per l'Italia [97], [98] grazie ai commerci della Serenissima, con il principale scopo di nobilitare l'architettura presente in città.

La prima pietra utilizzata nelle fondazioni è stata l'Arenaria, proveniente dallo spoglio di edifici nella località romana di Altino (entroterra Veneziano). In alcuni casi è possibile trovarla anche come apparato decorativo nelle chiese più antiche.

A partire dalla metà del XIII secolo la pietra più utilizzata nella città è la Pietra d'Istria, in quanto di facile reperibilità grazie al trasporto via nave dai suoi giacimenti in Croazia (costa istriana da Parenzo a Pola) [91], [98], [99], [100], [101]. Essa è un calcare di scogliera di natura sedimentaria formata essenzialmente da carbonato di calcio microcristallino e è caratterizzata da sfumature variabili grigio-verdi, derivanti da impurità di ossidi di ferro e materiali argillosi. La bassa porosità e l'elevata compattezza lo rendono un materiale impermeabile. È stato utilizzato sia come rivestimento delle facciate degli edifici, sia come elemento di fondazione o lungo i canali per limitare il fenomeno di umidità da risalita capillare, grazie alla sua elevata resistenza all'ambiente marino. È stato utilizzato anche come elemento portante nella struttura grazie alla sua alta resistenza a compressione.

Si può trovare anche il marmo di Carrara [98] che è una pietra di origine metamorfica costituita da calcare microcristallino di colore bianco, con impurità di minerali di ferro. I principali luoghi di provenienza di questo materiale sono le cave di Carrara o in Grecia. In ambiente veneziano questa tipologia di marmi mostra una limitata durabilità, specialmente nelle aree direttamente esposte agli agenti atmosferici. Da qui ne deriva l'utilizzo per soli scopi ornamentali (statue ecc.). È abbondante la presenza in laguna del marmo rosso di Verona, soprattutto a partire dalla metà del 1400, utilizzato come lastre di pavimenti, colonne, capitelli, contorni di porte e finestre [98]. Esso è di origine sedimentaria, di colore variabile dal giallo (ematite) al rosso-marrone (limonite). Tra i vari componenti di questo tipo di marmo possiamo trovare il quarzo, minerali argillosi (che comportano una minor resistenza agli agenti di degrado), manganese e vari ossidi di ferro. L'eterogeneità della sua struttura ne determina una bassa durabilità, con elevato degrado nelle parti direttamente esposte agli agenti atmosferici.

---

<sup>15</sup> Rinzaffo: primo strato di malta ruvido, steso sopra i mattoni (o altro tipo di supporto) affinché penetri in ogni interstizio, atto a ricevere gli strati successivi di intonaco.

<sup>16</sup> Arriccio: tipologia di malta di consistenza granulosa e irregolare, applicata alla muratura in seguito allo strato di rinzaffo, con lo scopo di uniformare la superficie eliminando i difetti di planarità e verticalità, e far aggrappare maggiormente l'intonaco, fornendo anche una buona riserva di umidità.



Figura 17. Esempio di applicazione di pietra basamentale.

Altra pietra diffusa nel territorio lagunare è la trachite euganea (estratta dalle colline dei Colli Euganei)[102], caratterizzata dalle colorazioni grigia e gialla con venature. La sua elevata resistenza meccanica e alla salsedine ne ha visto un largo utilizzo nella città Veneziana, sia per stabilizzare e consolidare i luoghi edificati (fondazioni, arginamento dei canali), sia come pavimentazione, i cui blocchi denominati “*masegni*” hanno spessori variabili dai 2 ai 10 cm a seconda dell’impiego (rispettivamente per rivestimenti interni, es. scale, o pavimentazioni esterne di piazze). L’esposizione all’aria può provocare alterazione cromatica ed esfoliazione superficiale,

#### 4.2 Il degrado dei materiali in ambiente veneziano

Tutti i materiali, essendo costantemente sottoposti al moto ondulatorio della laguna, sono soggetti a degradi superficiali che ne alterano la struttura, sia dal punto di vista estetico che strutturale (Tabella 11). Le azioni che concorrono al degrado dei materiali lapidei si dividono in:

- Azioni fisico-meccaniche, come dilatazioni e contrazioni provocate da variazioni di temperatura, disgregazione dall’azione del gelo, esfoliazione e cristallizzazione causata dalla presenza di Sali solubili trasportati dall’umidità;
- Azioni chimiche, provocate da silicati e carbonati, con la conseguenza di alterare le prestazioni del materiale;
- Azioni biologiche, con degrado sia a livello microscopico (batteri, muschi, licheni, alghe) che macroscopico (radici) con la formazione di incrostazioni.

La normativa NorMaL 1/88 [103], poi sostituita dalla UNI 11182 [104], fornisce la definizione e la classificazione delle diverse forme di alterazione e degrado dei materiali lapidei, permettendo di rilevare lo stato di conservazione di una parete. È fondamentale considerare che il degrado di una superficie può dipendere sia da aggressioni provenienti dall’ambiente esterno, che da azioni o co-azioni che hanno origine tra la superficie stessa ed il supporto murario sottostante.

Tabella 11. Classificazione degradi secondo NorMaL 1/88.

<b>Classe</b>	<b>Tipologia di degrado</b>	<b>Descrizione</b>
1 - Degrado senza peggioramento delle condizioni (superficiale)	Alterazione cromatica	Variazione naturale colore
	Macchia	Pigmentazione localizzata
	Patina	Modifica naturale
2 - Perdita di materiale superficiale	Erosione	Asportazione di materiale
	Pitting	Formazione di fori ciechi
	Alveolizzazione	Cavità variabili, interconnesse
3 - Perdita della morfologia del manufatto	Disgregazione	Caduta materiale (polvere/frammenti)
	Esfoliazione	Formazione di sfoglie
	Scagliatura	Distacco di scaglie
	Distacco	Caduta strati del materiale
	Mancanza	Perdita elementi tridimensionali
	Lacuna	Caduta e perdita dipinto, intonaco, rivestimento, mosaico
4 - Deposizione e/o formazione prodotti secondari (in superficie)	Incrostazione	Deposito compatto di forma stalattitica/stalagmitica
	Deposito superficiale	Accumulo materiali estranei di scarsa aderenza
	Crosta	Modifica strato
	Efflorescenza	Sali (colore bianco e aspetto cristallino)
	Pellicola	Strato trasparente/opaco di sostanze coerenti fra loro ma estranee al materiale lapideo
	Patina biologica	Strato sottile e omogeneo costituito da microrganismi
5 - Riduzione della resistenza meccanica	Deformazione	Variazione sagoma/forma (intero spessore del materiale)
	Rigonfiamento	Sollevamento superficiale localizzato
	Fratturazione/fessurazione	Spostamento di parti del materiale
6 - Colonizzazione biologica	Colonizzazione biologica	Colonie di microrganismi (macchie)

### 4.3 I materiali nei trattati storici

«L'esperienza delle cose passate»<sup>17</sup> è fondamentale per la conoscenza dell'odierno, concetto che vale anche in ambito architettonico per quanto riguarda le caratteristiche dei materiali da costruzione e il loro comportamento in opera.

Fin dall'antichità restauro e manutenzione sono stati considerati come temi di fondamentale importanza, avendo coscienza del fatto che la scelta della tipologia dei materiali e il loro corretto

<sup>17</sup> Citazione di Francesco Milizia nei "Principi di Architettura civile".

utilizzo in cantiere, garantissero la durata e la stabilità degli edifici nel tempo. Di seguito si riportano alcuni trattati, che descrivono alcune delle metodologie costruttive adottate per preservare gli edifici nel tempo, con particolare riferimento ai fenomeni legati alla presenza di umidità [24].

Il *De architectura* (Marco Vitruvio Pollione, 15 a.C.)[105], libro riconosciuto come una delle principali fonti dei metodi costruttivi degli antichi romani, descrive i materiali da costruzione più diffusi, tra cui il mattone, e come deve avvenire il loro utilizzo per la realizzazione delle strutture murarie. Le murature devono essere realizzate in primavera o autunno, con un tempo di stagionatura di almeno due anni per favorire l'aderenza di malta e intonaco<sup>18</sup>: «[...] *l'edificio dovrà avere fondamenta solide e sarà costruito usando i materiali più idonei [...]*»<sup>19</sup>. Nella composizione delle malte bisogna tenere in considerazione una corretta percentuale di acqua nell'impasto, che poi risulterà "assorbita" dai pori del materiale stesso e all'interno dei mattoni, per raggiungere uno stato finale di equilibrio. Per la realizzazione degli intonaci nei muri umidi, Vitruvio suggerisce l'utilizzo del Cocciopesto, in modo che sia duraturo nel tempo: «[...] *nelle stanze a pian terreno [...] non con sola calcina, ma con dei cocci rotti, e poi s'intonachi, affinché non patisca con l'umido questa porzione d'intonaco [...]*»<sup>20</sup>. È inoltre fondamentale la scelta del luogo di fondazione di un edificio o città (analisi edificio-clima), considerando i parametri termoigrometrici (temperatura dell'aria e umidità relativa) e la destinazione d'uso finale. Nella fase di restauro, per edifici colpiti da superfici umide<sup>21</sup>, il trattato suggerisce la realizzazione di una seconda parete staccata da quella umida, con aperture in alto e in basso, per favorire la circolazione di aria.

Il *De re ædificatoria* (Leon Battista Alberti, 1443-1452)[106], trattato sull'architettura e edilizia in generale, cita l'utilizzo del mattone come elemento costruttivo principale in sostituzione alla pietra<sup>22</sup>, con particolare riferimento alla stagionatura, che deve avvenire prima della sua lavorazione (nel periodo primaverile, dopo la maturazione durante l'inverno), e successiva cottura in fornace.

Anche nel trattato *Principi di Architettura Civile* (Francesco Milizia, 1781)[107] viene descritto il processo di realizzazione del mattone: l'argilla non dev'essere ghiaiosa o sassosa; l'estrazione deve avvenire in autunno e la macerazione in inverno, mediante esposizione a cielo aperto; l'essiccamento deve avere una durata di due anni e cottura per 48 ore. A seconda del grado di cottura (e del colore ottenuto) si avrà un differente utilizzo del mattone stesso: meno cotti di colore giallo-rosso, per muri al coperto non esposti ad umidità e fuoco; cotti di colore rosso utilizzati all'esterno; cotti di colore bruno per muri esposti all'umidità e fuoco (es. fornaci). I mattoni saranno poi legati insieme dalla malta. Dalla qualità di quest'ultima «*dipende tutta la bontà della costruzione*»<sup>23</sup>; è quindi necessaria una giusta proporzione di calce e sabbia per ottenere un buon materiale di allettamento, in base alla varietà e origine.

---

<sup>18</sup> Libro II – materiali e tecniche costruttive.

<sup>19</sup> Citazione di Marco Vitruvio Pollione nel "De architectura", Libro I – ruolo e competenze dell'architetto.

<sup>20</sup> Citazione di Marco Vitruvio Pollione nel "De architectura", Libro VII – edifici privati.

<sup>21</sup> Libro V – edifici pubblici.

<sup>22</sup> Parte II – tipologie di edifici.

<sup>23</sup> Citazione di Francesco Milizia nei "Principi di Architettura civile", Libro I, Tomo III, Capitolo V.

Il *Traité theorique et pratique de l'Art de Bâtir* (Jean-Baptiste Rondelet, 1802)[90], [108] descrive la necessità di realizzare murature con mattoni nuovi affinché si voglia garantire una buona durabilità dell'edificato, principalmente correlato ai problemi di umidità. I corsi orizzontali dovranno essere alternati tra loro, utilizzando elementi puliti, bagnati con acqua e poi posati con un abbondante strato di malta di buona qualità, battendoli leggermente con martello o cazzuola. Tali murature devono essere realizzate preferibilmente nelle stagioni temperate; nella stagione estiva, si devono tenere costantemente freschi mediante innaffiatura, mentre nella stagione invernale coperti con paglia.

#### **4.4 Le caratteristiche dei materiali veneziani**

Mediante l'analisi degli studi eseguiti sulle murature degli edifici Veneziani negli ultimi 35 anni, è stato possibile effettuare un'analisi macroscopica dello stato di conservazione dei materiali e delle principali caratteristiche chimiche, fisiche, mineralogiche e meccaniche [109], [110], [111], [112], [113], [114], [115], [116]. Tali parametri derivano dalla collezione di 51 casi studio (Figura 18), costruiti tra il XIII e XVIII secolo, categorizzati per quanto riguarda i differenti ambiti di studio e georeferenziati con sistema GIS (software QGIS – Quantum Geographic Information System).

Il sistema di georeferenziazione GIS ha permesso di attribuire ai vari dati informazioni di tipo geografico, mediante l'utilizzo di punti come elementi vettoriali, con l'obiettivo di analizzare visivamente la distribuzione sul territorio Veneziano dei siti indagati. Il sistema di riferimento utilizzato come base cartografica è EPSG:3857 – WGS 84 (Figura 19), un sistema di coordinate latitudine/longitudine utilizzato soprattutto nei sistemi GPS. Ad ogni elemento vettoriale (primitiva vettoriale puntuale), la cui dimensione significativa è la posizione, corrispondono una serie di attributi; dapprima sono stati creati una serie di layer utili alla identificazione del dato a seconda del campionamento eseguito (chimico/fisico/mineralogico), in seguito, ad ogni layer si assegnano una serie di tabelle di attributi. Le tabelle degli attributi contengono le seguenti informazioni: edificio, riferimento bibliografico, periodo storico di realizzazione dell'edificio, materiale indagato e parametri chimici/fisici/mineralogici. Questi ultimi si suddividono in (Figura 20):

- Analisi chimica – concentrazione [%] delle maggiori specie chimiche presenti, come ossidi di calcio/magnesio/ferro/potassio/solfato, silice, allumina, cloruri;
- Analisi fisico-meccanica – principali caratteristiche compositive, come porosità [%], densità [kg/m<sup>3</sup>], resistenza a compressione [N/mm<sup>2</sup>], permeabilità [kg/m<sup>2</sup>·s], assorbimento d'acqua [%], coefficiente di saturazione [-], dimensione dei pori [µm];
- Analisi mineralogica – concentrazione [+/-] delle principali specie minerali presenti, come quarzo, calcite, dolomite, illite, ematite, feldspato, ecc.

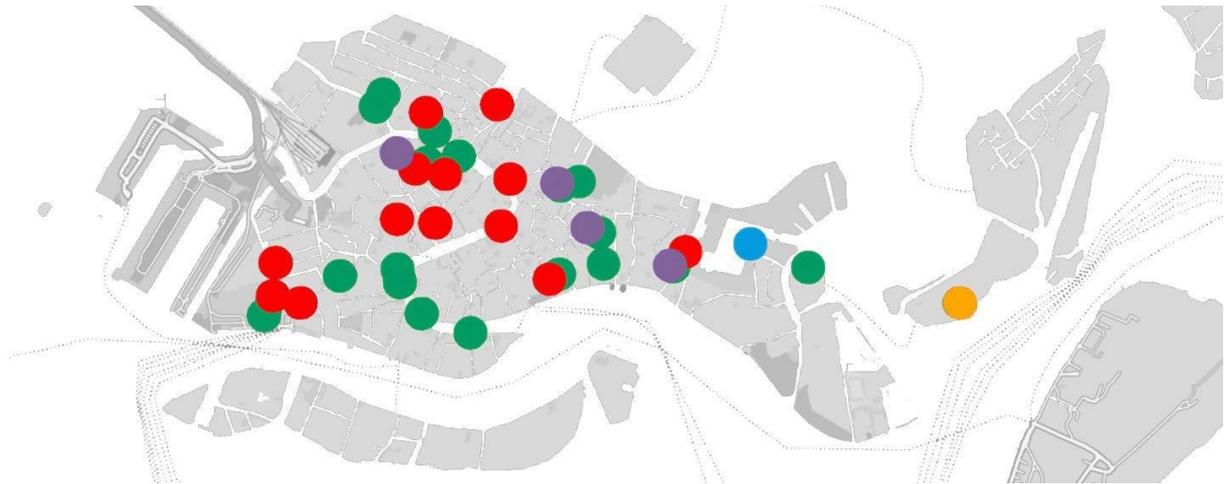


Figura 18. Localizzazione dei casi studio Veneziani per i materiali costruttivi. In verde: analisi chimica; in viola: analisi fisica; in rosso: analisi chimica + fisica; in blu: analisi chimica + mineralogica; in giallo: analisi fisica + mineralogica.

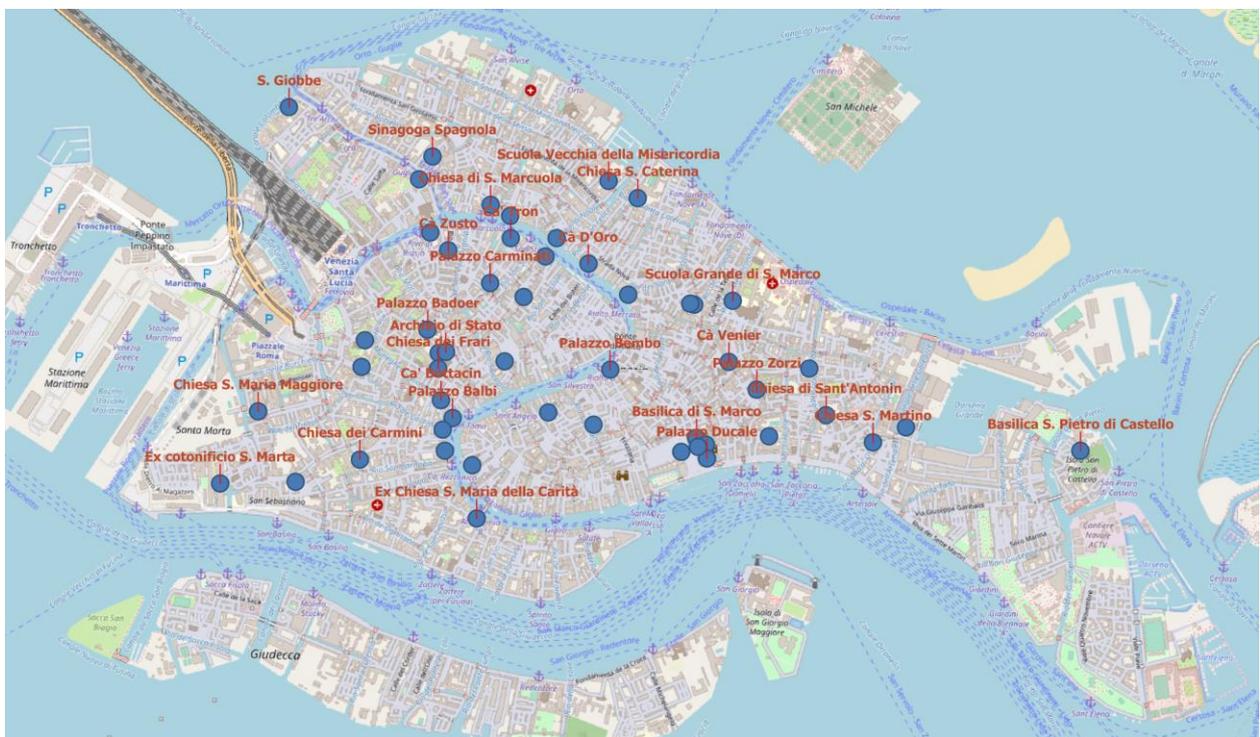


Figura 19. Georeferenziazione elementi vettoriali (edifici) in QGIS su base cartografica EPSG:3857 – WGS 84.

Il database creato è costituito da 87 osservazioni totali, che comprendono differenti materiali e campi di analisi (Tabella 12), in differenti edifici: 45 analisi di tipo chimico, 29 analisi di tipo fisico-meccanico e 13 analisi di tipo mineralogico.

Le analisi di tipo chimico (composizione in ossidi basici e acidi, Tabella 13), sono state fatte per un 59% dei casi su mattoni, probabilmente correlate alla facilità di perforazione del materiale nella muratura; un 36% delle analisi è stata condotta su malte e intonaci, il restante 5% su varie tipologie di pietre. Il mattone ha una composizione intorno al 50% di silice con una variabilità intorno al 5%, un 15% di allumina circa e una percentuale variabile tra il 6% e il 18% di ossido di

Edificio	Venezia - Palazzo Badoer	Edificio	Venezia - Palazzo Badoer	Edificio	Venezia - Arsenale
Riferimenti	Biscontin et al. (1979), Tesser et al. (2012)	Riferimenti	Biscontin G. et al. (1979), Tesser et al. (2012)	Riferimenti	Antonelli et al. (2002), Fassina et al. (2011)
Link riferimenti	<a href="#">1979-2012_Biscontin-Tesser_PalazzoBadoer.pdf</a>	Link riferimenti	<a href="#">1979-2012_Biscontin-Tesser_PalazzoBadoer.pdf</a>	Link riferimenti	<a href="#">2002-2011_Antonelli-Fassina_Arsenale.pdf</a>
Periodo	12 - XV sec.	Periodo	11 - XIV sec.	Periodo	12 - XV sec.
Materiale	Mattoni (Mattoni)	Materiale	Mattoni (Mattoni)	Materiale	Mattoni (Mattoni)
CaO [%]	10,910	Porosità [%] (min)	25	Quarzo	+++
MgO [%]	4,020	Porosità [%] (max)	43	Calcite	++
SiO2 [%]	56,800	Densità [kg/m3] (min)	1400	Dolomite	+-
Al2O3 [%]	14,350	Densità [kg/m3] (max)	1600	Illite	++
K2O [%]	2,800	Resistenza a compressione [N/mm2] (min)	NULL	Plagioclasio	+-
Fe2O3 [%]	7,050	Resistenza a compressione [N/mm2] (max)	NULL	Clorite	(nessuna selezione)
TiO2 [%]	0,8	Costante di permeabilità [kg/m2 min-0.5] (min)	0,38	Caolinite	(nessuna selezione)
SO3 [%]	0,075	Costante di permeabilità [kg/m2 min-0.5] (max)	0,66	Paragonite	(nessuna selezione)
P2O5 [%]	0,01	Coeff. di assorbimento d'acqua [%] (min)	0,17	Feldspato	+
SrO [%]	0,05	Coeff. di assorbimento d'acqua [%] (max)	0,31	Anfiboli	(nessuna selezione)
Na2O [%]	1,450	Dimensione dei pori [µm] (min)	0,1		
CO2 [%]	NULL	Dimensione dei pori [µm] (max)	10,00000		
MnO [%]	0,15	Coeff. di saturazione (min)	0,75		
H2O [%]	19,550	Coeff. di saturazione (max)	0,91		

Figura 20. Esempi di tabelle di attributi in QGIS: (a) parametri chimici, (b) parametri fisici, (c) parametri mineralogici.

calcio; infine, gli ossidi di ferro e magnesio sono presenti in quantità minori, intorno al 5-6%. Per quanto riguarda malte e intonaci le componenti presenti in maggior quantità sono silice, solfati e ossido di calcio, con un'elevata variabilità tra il 16% e il 40%. È risultato molto più difficile trovare dati sulle pietre, e le uniche informazioni riguardano la pietra d'Istria in quanto largamente diffusa nel territorio veneziano. Le uniche informazioni ottenute riguardano la quantità di solfati, ampiamente variabili tra il 13% e il 25%.

Per quanto riguarda la caratterizzazione fisico-meccanica (Tabella 14, in merito alle grandezze di porosità, densità, permeabilità, capacità di assorbimento d'acqua, coefficiente di saturazione, raggio dei pori e resistenza a compressione), si hanno a disposizione maggiori informazioni sul mattone (95%), con una più ampia conoscenza sulla composizione strutturale del materiale (82%) e poche informazioni sulle variabili igrometriche (18%, Figura 21). Il mattone presenta un'elevata variabilità sia per quanto riguarda la porosità (20-40%), la densità (1360-1850 kg/m<sup>3</sup>), che la resistenza meccanica (3-31 N/mm<sup>2</sup>); le variabili igrometriche (permeabilità, assorbimento e saturazione) mostrano invece una variabilità notevolmente inferiore e limitata tra i vari campioni analizzati. I dati sulle malte sono veramente pochi, e l'unica informazione recuperata è la densità del materiale, più elevata rispetto al mattone, per la quale però non è possibile definirne la variabilità. Infine, nella pietra d'Istria si osserva una porosità ridotta, densità e resistenza a compressione elevate, con capacità di assorbimento capillare dimezzato rispetto al laterizio, dimostrando la ridotta capacità di suzione del materiale.

Infine, le analisi mineralogiche di cui si sono raccolte informazioni sono state effettuate solamente su mattoni, sottolineando una elevata presenza nel materiale di quarzo (come fase cristallina della silice SiO<sub>2</sub>, riscontrata anche nelle analisi chimiche), calcite (costituita da carbonato di calcio CaCO<sub>3</sub>), e illite (minerale comune nei composti a base di argilla).

Tabella 12. Database materiali Veneziani con riferimenti bibliografici e relativa caratterizzazione analizzata.

Edificio	Rif. Bibliografico	Materiale	Caratterizzazione		
			Chimica	Fisica	Mineral.
Archivio di Stato	Zago et al. (1982)[117]	Mattone	X	X	
Basilica di S. Marco	Biscontin et al. (1990)[98] Fassina et al. (1994, 1998)[112], [118]	Mattone Marmorino	X	X	X
Basilica S. Maria Assunta	Fassina et al. (1990)[119]	Mattone	X		
Basilica S. Pietro di Castello	Bakolas et al. (1995)[113]	Malta calce-sabbia	X		
Ca' Badoer	Bakolas et al. (1995)[113] Biscontin et al. (1979)[120] Tesser et al. (2012)[115]	Mattone Malta calce-sabbia	X	X	X
Ca' Foscari	Biscontin et al. (1982)[121]	Mattone	X		
Ca' da Mosto	Bakolas et al. (1996)	Mattone	X	X	
Ca' d'Oro	Tesser et al. (2012)[115]	Mattone	X	X	X
Ca' Pesaro	Biscontin et al. (1989)[122]	Pietra d'Istria	X		
Ca' Vendramin Calergi	Biscontin et al. (1981)	Marmorino	X		
Ca' Venier	Biscontin et al. (1982)[121]	Mattone	X		
Ca' Zusto	Mirabella Roberti et al. (2006)[123]	Mattone		X	
Campanile di S. Marco	Baronio et al. (1982)[124]	Mattone	X	X	
Casetta ex-Palma	Zago et al. (1982)[117]	Mattone	X	X	
Chiesa dell'Angelo Raffaele	Zago et al. (1982)[117]	Mattone	X	X	
Chiesa dei Carmini	Bakolas et al. (1995)[113]	Malta calce-sabbia	X		
Chiesa S. Caterina	Fazio et al. (1982)[88]	Mattone	X	X	X
Chiesa dei Frari	Fazio et al. (1982)[88] Tesser et al. (2012)[115]	Mattone	X	X	X
Chiesa di S. Giacomo in Paludo	Fazio et al. (1982)[88] Tesser et al. (2012)[115]	Mattone	X	X	X
Chiesa Isola della Certosa	Tesser et al. (2012)[115]	Mattone		X	X
Chiesa di S. Lorenzo	Tesser et al. (2012)[115]	Mattone	X	X	X
Chiesa di S. Marcuola	Baronio et al. (1982)[124]	Mattone	X	X	
Chiesa S. Maria della Carità	Bakolas et al. (1995)[113]	Malta calce-sabbia	X		
Chiesa di S. Maria Maggiore	Zago et al. (1982)[117] Bakolas et al. (1995)[113]	Mattone Malta calce-sabbia	X	X	
Chiesa S. Maria dei Miracoli	Fassina et al. (1996)[125]	Mattone	X		
Chiesa S. Maria Mater Domini	Zago et al. (1982)[117]	Mattone	X	X	
Chiesa di S. Martino	Zago et al. (1982)[117]	Mattone	X	X	
Chiesa Ognissanti	Biscontin et al. (1982)[126]	Marmorino	X		
Chiesa di S. Polo	Zago et al. (1982)[117]	Mattone	X	X	
Chiesa S. Zaccaria	Bakolas et al. (1995)[113]	Malta calce-sabbia	X		
Convento dei Frari	Biscontin et al. (1983)[111] Tesser et al. (2012)[115]	Mattone Malta calce-sabbia	X	X	X

Corderie dall'Arsenale	Bakolas et al. (1995)[113]	Mattone Malta calce-sabbia	X	X	X
	Fassina et al. (2002, 2011)[114], [127] Antonelli et al. (2002)[128] Tesser et al. (2012)[115]				
Ex-cotonificio S. Marta	Biscontin et al. (1982)[121]	Mattone	X		
Palazzo Bembo	Bakolas et al. (1995)[113]	Mattone Malta calce-sabbia	X	X	
Palazzo del Bovolo	Tesser et al. (2012)[115]	Mattone	X	X	X
Palazzo Carminati	Biscontin et al. (1981)[126]	Marmorino	X		
Palazzo Ducale	Biscontin et al. (1989)[122]	Mattone	X	X	X
	Fassina et al. (1996)[125] Tesser et al. (2012)[115]	Pietra d'Istria			
Palazzo Gussoni-Grimani	Foraboschi et al. (2014)[116]	Mattone		X	
Palazzo Nani	Bakolas et al. (1995)[113]	Malta calce-sabbia	X		
Palazzo Pesaro (ora Fortuny)	Tesser et al. (2012)[115]	Mattone	X	X	X
Palazzo Van Axel	Fazio et al. (1982)[88]	Mattone		X	
Palazzo Venier-Manfrin	Bakolas et al. (1995)[113]	Malta calce-sabbia	X		
Palazzo Zambelli-Pemma	Zago et al. (1982)[117]	Mattone	X	X	
Palazzo Zorzi	Bakolas et al. (1995)[113]	Malta calce-sabbia	X		
Piazza di Malamocco	Tesser et al. (2012)[115]	Mattone	X	X	
Scuola Grande di S. Marco	Bakolas et al. (1995)[113]	Malta calce-sabbia	X		
Scuola Vecchia della Misericordia	Bakolas et al. (1995)[113]	Mattone Malta calce-sabbia	X	X	
Sinagoga Spagnola	Biscontin et al. (1981)[126]	Marmorino	X		

Tabella 13. Caratterizzazione chimica dei materiali Veneziani (principali componenti): silice SiO<sub>2</sub>, allumina Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ossido di calcio CaO, ossido di ferro Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ossido di magnesio MgO, solfati SO<sub>4</sub>.

Materiale	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>4</sub>
Mattone	53 ± 5	15 ± 1	12 ± 6	6 ± 1	5 ± 2	4 ± 6
Malta / intonaco	22 ± 14	4 ± 2	29 ± 13	2 ± 1	7 ± 3	22 ± 11
Pietra d'Istria	-	-	-	-	-	19 ± 6

Tabella 14. Caratterizzazione fisico-meccanica dei materiali Veneziani ( $\varphi$  [%] = porosità,  $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>] = densità,  $\pi$  [kg/m<sup>2</sup> s] = permeabilità, CA [%] = capacità di assorbimento d'acqua,  $\theta$  [-] = coeff. di saturazione,  $\emptyset$  [ $\mu$ m] = raggio dei pori,  $\sigma_{10}$  [N/mm<sup>2</sup>] = resistenza a compressione).

Materiale	$\varphi$	$\rho$	$\pi$	CA	$\theta$	$\emptyset$	$\sigma_{10}$
Mattone	28±11	1608±246	0.2±0.02	31±5	0.9±0.03	0.5±0.55	17±14
Malta	-	1750	-	-	-	-	-
Pietra d'Istria	6±1	2680±14	-	15±7	-	49.5±57	137±20

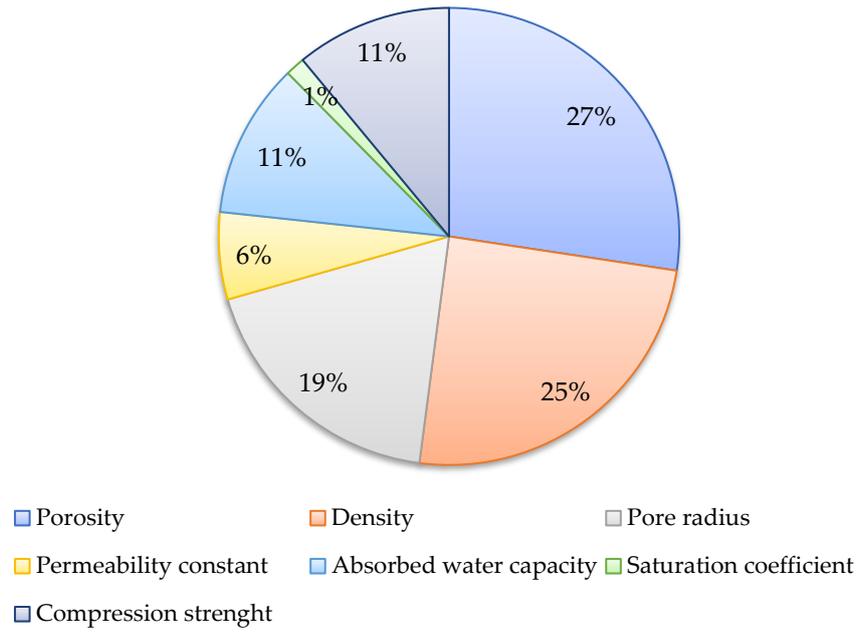


Figura 21. Numero di dati collezionati relativamente la caratterizzazione fisico-meccanica del mattone.



## 5. Gli edifici Veneziani e la risalita capillare

*Venezia, città nota per le sue peculiarità storico-culturali, è uno dei luoghi simbolo affetti dal problema della risalita capillare. Gli edifici sono costantemente a contatto con l'acqua salmastra di laguna, nonché soggetti alle alte maree che provocano varie inondazioni durante l'anno solare. In passato, alcuni illustri architetti hanno presentato in una serie di trattati storici alcune delle nozioni più importanti per quanto riguarda la gestione e manutenzione delle costruzioni, la scelta dei materiali e la loro posa in opera, tenendo in considerazione il luogo di realizzazione dell'opera e le sue caratteristiche climatiche. Tali libri contengono molte informazioni fondamentali per la corretta conservazione del patrimonio architettonico, soprattutto in una città come Venezia, costantemente soggetta a condizioni al contorno di particolare rilevanza.*

*Alcuni di questi fondamenti sono stati considerati anche dagli antichi mastri costruttori della città lagunare, con specifiche attenzioni ai materiali più diffusi: mattone, malta, intonaco e pietra. Su questi ultimi molti studi sono stati effettuati negli ultimi 30-40 anni, per determinarne la composizione fisico-chimica-mineralogica e quali siano cause o agenti che ne provocano il degrado. Lo scopo finale di queste ricerche era quello di proporre delle soluzioni di manutenzione e conservazione del costruito, derivanti dagli elevati contenuti di umidità da risalita capillare registrati nelle murature.*

*Questo lavoro ha inoltre previsto la riorganizzazione di queste informazioni in un unico dataset, georeferenziato, per avere una lettura chiara ed immediata degli elementi a disposizione e no, con l'obiettivo futuro di poter completare con i dati mancanti e ottenere una catalogazione completa del costruito Veneziano.*

## 5.1 Gli edifici Veneziani e il contesto lagunare

Quasi tutti gli edifici veneziani hanno una struttura muraria in mattoni di argilla e malta di calce, e poggiano su terreni permeabili ricchi di aerosol salini e lambiti da acque salmastre, oltretutto esposti ad un'umidità relativa superiore al 70%. Il contatto con l'acqua è continuo, e il problema delle inondazioni è ben documentato fin dall'antichità. Il fenomeno si è accentuato ulteriormente negli ultimi anni a causa dell'aumento del livello delle maree (+7.00 cm dal 2000 al 2020 [129]) e della loro maggior frequenza, per ragioni di tipo naturale o antropico [130], [131]. La stazione mareografica che fornisce indicazioni sul livello delle maree nella città è la stazione di Punta della Salute, fin dal 1923, con riferimento del livello di marea all'anno 1897 calcolato dall'Istituto Geografico Militare (ZMPS<sup>24</sup>) [132]. I livelli delle maree vengono quindi classificati come in Tabella 15, identificando la quota di +110 cm come livello critico.

Dal grafico in Figura 22 si osserva l'andamento del livello medio del mare registrato a Venezia, riscontrando un innalzamento nel corso dei decenni, arrivando attualmente a circa 32 cm in più di quanto verificatosi all'inizio del secolo scorso.

La marea più alta registrata finora è stata quella del 4 novembre 1966, in cui si è raggiunto il livello di +194 cm, mentre l'ultimo evento eccezionale è avvenuto il 12 novembre 2019 con un livello di +187 cm.

Tabella 15. Classificazione maree a Venezia (rif. ZMPS) e percentuali di allagamento del territorio cittadino [133].

Tipo marea	Livello [cm]	Allagamento città [%]
Eccezionale	$\geq 140$	59 - 91
Alta	110 ÷ 140	12 - 59
Medio-alta	80 ÷ 110	2 - 12
Normale	-50 ÷ 80	-
Bassa	-90 ÷ -50	-
Bassa eccezionale	< -90	-

Per la salvaguardia della città sono state pianificate varie strategie negli anni ad opera del Magistrato alle Acque di Venezia e del consorzio CORILA. Una prima azione ha previsto l'elaborazione di una legge speciale (L. 16 aprile 1973, n° 171 – Interventi per la salvaguardia di Venezia – Legge Speciale per Venezia [134]) con l'obiettivo di disinquinare e risanare la Laguna mediante operazioni in differenti ambiti di intervento: settore fognario e depurazione, acquedotti, territorio, agricoltura e zootecnia, bonifica siti inquinati, monitoraggio e sperimentazione. Successivamente si è provveduto alla progettazione e realizzazione del sistema di paratie mobili MOSE<sup>25</sup> [133], collocate alle bocche di porto della Laguna Veneta (Lido, Malamocco e Chioggia), che entrano in funzione in previsione di maree da + 110 cm fino ad un massimo di + 300 cm. L'opera è stata testata per la prima volta ad ottobre 2020.

<sup>24</sup> Zero Mareografico di Punta della Salute

<sup>25</sup> Modulo Sperimentale Elettromeccanico

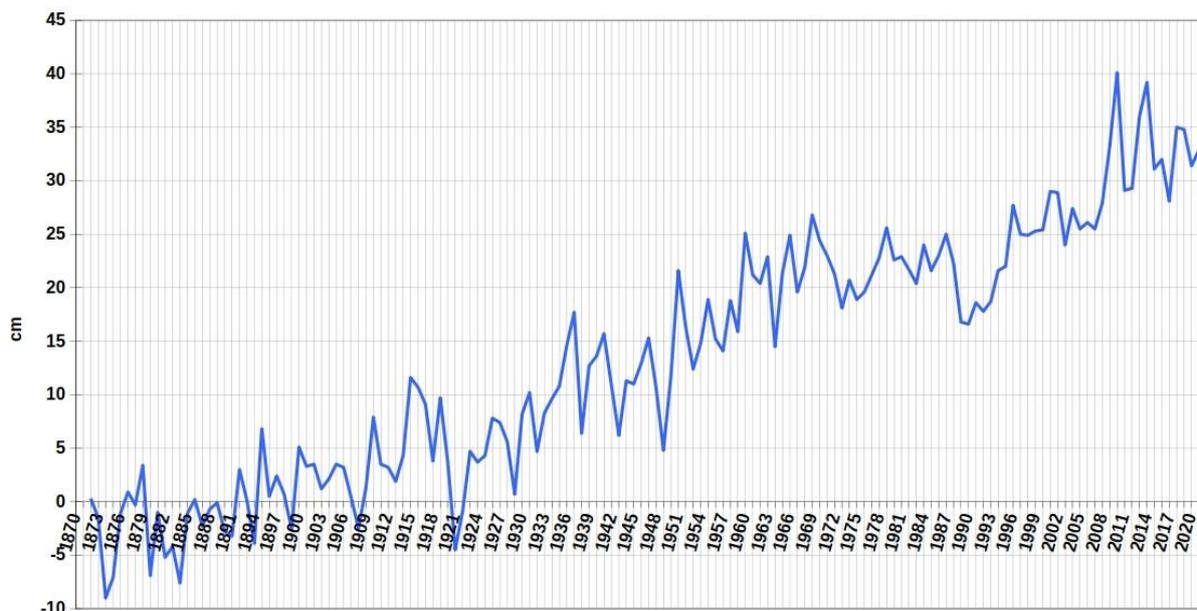


Figura 22. Variazione del livello medio del mare a Venezia, dal 1872 al 2022 (fonte: Centro Previsioni e Segnalazioni Maree, Città di Venezia)[129].

Il contesto ambientale fa sì che l'acqua possa penetrare profondamente all'interno del materiale poroso mediante risalita capillare, comportando oltre ai danni estetici (Tabella 16), la perdita di isolamento termico, problemi di natura igienica, nonché danni di natura meccanica dovuti all'azione disgregante dei Sali idrosolubili fino al 50% del volume del materiale (8-10% in peso di Sali solubili totali - 70-80% di cloruro di sodio NaCl, zolfo S, magnesio Mg, calcio Ca, potassio K e carbonati; in quantità minori si possono trovare anche bromo Br, stronzio Sr, boro B e fluoro F e altre tipologie di Sali la cui origine è l'atmosfera, come anidride carbonica CO<sub>2</sub>, ossigeno O<sub>2</sub> e azoto N<sub>2</sub>), che cristallizzando provocano l'esfoliazione dapprima dell'intonaco e poi dello strato corticale dei mattoni ("cartella")[135].

Tabella 16. Principali rischi provocati dai cambiamenti climatici sul patrimonio culturale [136].

Parametri climatici	Impatti sul patrimonio culturale
Variazione umidità ambientale	Alterazione proprietà fisiche materiali, cristallizzazione Sali solubili, erosione materia organica/inorganica, degrado biologico
Variazione temperatura	Danni alla struttura dei materiali porosi, degrado biochimico
Aumento livello maree	Erosione/perdita materiale
Vento	Penetrazione umidità all'interno delle strutture murarie, danni strutturali, erosione superfici
Inquinamento	Dissoluzione carbonati con perdita materiale, annerimento superfici, crescita colonie biologiche

L'acqua nelle murature, con una concentrazione media di Sali disciolti pari a 30-35 g/L, può raggiungere altezze medie di 2.5-3 m, con casi limite fino a 5 m, ma il maggior contenuto di umidità si registra nella parte inferiore, attorno al 25%. Parallelamente alla diminuzione

percentuale dell'umidità all'aumentare dell'altezza, aumenta la velocità di evaporazione, lasciando un'elevata presenza di Sali solubili (solfato di magnesio e solfato di sodio).

Il degrado (weathering,  $W$ ) può essere definito secondo la seguente funzione:

$$W = f(i, e) \quad (20)$$

Dove:

$i$  sono i fattori intrinseci (composizione mineralogica, superficie esposta agli agenti atmosferici, tempo),  $e$  sono i fattori estrinseci (temperatura e umidità dell'aria, pressione atmosferica, azione della lisciviazione chimica, attività biochimica e biofisica).

Incidono anche la forma, ubicazione e/o contesto ambientale in cui il manufatto si trova. Lo stadio di alterazione di un materiale da costruzione può quindi essere definito quantificando l'alterabilità dello stesso ( $w'$ ), ovvero la variazione delle sue caratteristiche  $m$  in un determinato tempo  $t$  [secoli]:

$$w' = \frac{\Delta m}{\Delta t} \quad (21)$$

## 5.2 La risalita capillare a Venezia

La diagnosi della risalita capillare a Venezia, negli ultimi 30 anni è stata fatta sia con metodi invasivi che non invasivi; l'approccio più diffuso è il metodo quantitativo gravimetrico, per la determinazione del contenuto umido (MC%) in un determinato materiale [46].

Come precedentemente descritto al § 4.4, anche per l'analisi degli studi effettuati sul contenuto umido delle murature Veneziane è stato utilizzato un sistema di georeferenziazione dati mediante QGIS. Qui le tabelle degli attributi contengono le seguenti informazioni (Figura 23): edificio, riferimento bibliografico, periodo storico di realizzazione dell'edificio, tipologia parete analizzata (orientamento, piano, interno/esterno) e contenuto d'acqua [%] minima/massima.

Edificio	Venezia - Arsenale
Riferimenti	Riva et al. (1999), Fassina et al. (2002)
Link riferimenti	<a href="#">1999-2002 Riva-Fassina Arsenale.pdf</a>
Periodo	12 - XV sec.
Parete	Est
H2O (min) [%]	0,7
H2O (max) [%]	9,300
Parete	Nord
H2O (min) [%]	6,000
H2O (max) [%]	9,700
Parete	Ovest
H2O (min) [%]	25,000
H2O (max) [%]	26,000
Parete	Sud
H2O (min) [%]	1,000
H2O (max) [%]	12,000

Figura 23. Esempio tabella di attributi della risalita capillare in QGIS.

Vengono qui analizzati 19 casi studio di edifici Veneziani, per un totale di 341 osservazioni (Figura 24) [119], [120], [121], [127], [135], [137], [138], [139], su cui sono state fatte prove distruttive per valutare la capacità di assorbimento del materiale e le altezze raggiunte dalla risalita. Queste analisi sono state eseguite prevalentemente tra gli anni 1980-2000 (62% di casi), e successivamente riprese a partire dall'anno 2010 (26% dei casi), mediante il consorzio CORILA e soprattutto a partire dal 2018 con il progetto "Venezia 2021" [140]. Questo rilievo sottolinea la mancanza di dati per periodi molto lunghi e quindi spesso anche la difficoltà di confronto dei risultati ottenuti; queste sperimentazioni richiedono molti anni di investigazioni, difficoltà nell'elaborazione dei risultati e spese esose.

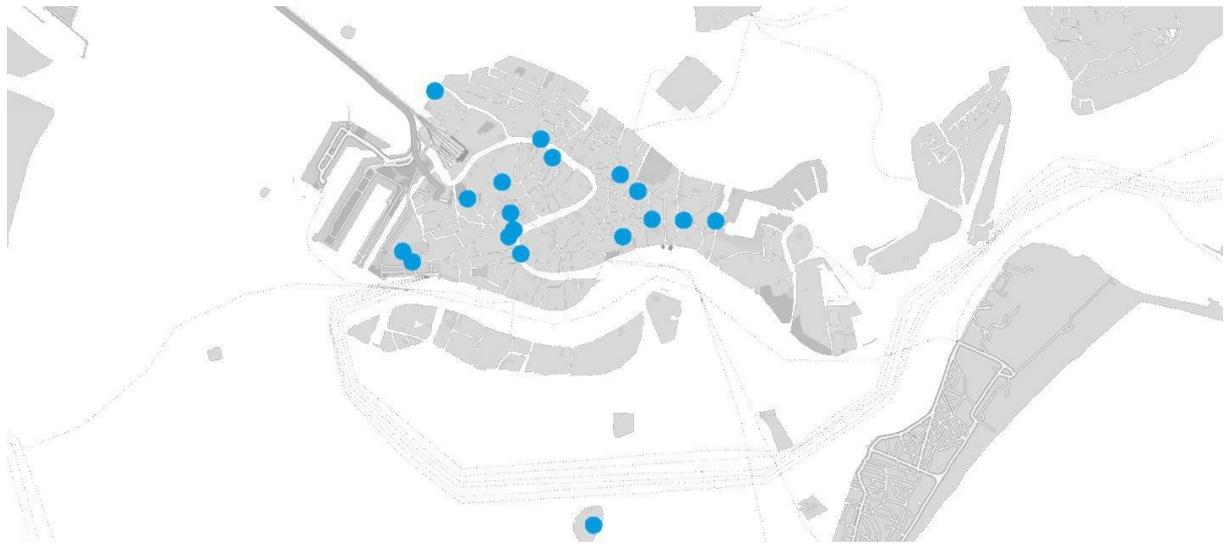


Figura 24. Casi studio Veneziani sulla risalita capillare (MC%).

I parametri valutati sono (i) la tipologia di muratura investigata – interno (196 dati) o esterno (145 dati), (ii) l'altezza di campionamento [cm], (iii) la profondità di campionamento [cm] e (iv) l'altezza del pavimento dell'edificio in relazione al riferimento di Punta della Salute [cm] [141].

In prima analisi è possibile notare una correlazione tra MC% e l'altezza di campionamento: all'aumentare della perforazione della muratura, diminuisce il contenuto d'acqua registrato (Figura 25). Si individuano quindi 3 macro-aree nelle strutture: (1) umido (< 200 cm di altezza), con elevato contenuto MC%; (2) area di transizione intermedia tra umido e asciutto (200-300 cm); (3) asciutto (> 300 cm) [137].

Esistono molte altre variabili che possono influenzare il fenomeno della risalita capillare nel patrimonio storico, intrinseche ed estrinseche. Il movimento dell'acqua salmastra all'interno della muratura ha mostrato un trend correlato al livello delle maree registrate (Tabella 18)[129].

Mediante un algoritmo di "selezione degli attributi" (*feature selection*), che permette di ridurre la dimensione di un dataset, è stato possibile identificare quali siano in questo modello gli attributi che influenzano maggiormente il modello predittivo in questione. Ogni osservazione viene quindi descritta da una serie di attributi, a cui l'algoritmo applica un peso nella

valutazione finale: (i) altezza del prelievo – 50%, (ii) profondità del prelievo – 16% e (iii) tipo di muro – 8%. Il rimanente 26% individua il tipo di edificio, parametro poco significativo in quanto ogni edificio è a sé stante. La rappresentazione dei risultati in un diagramma di flusso (Figura 26) permette di individuare quantitativamente i campionamenti effettuati e i risultati ottenuti. Il 69% delle murature ha registrato campionamenti ad un'altezza < 200 cm e ad una profondità > 5 cm, per investigare il cuore della muratura con una ridotta influenza dell'ambiente esterno. Se si considera il tipo di muro (interno/esterno) è possibile notare come i risultati di MC% non variano in modo significativo considerando questa distinzione.

Tabella 17. Riferimenti bibliografici utilizzati nel database creato per la valutazione del contenuto d'acqua nelle murature veneziane.

Edificio	Rif. Bibliografico	Anno campionamento	Tipologia parete	
			Interno	Esterno
Basilica di S. Marco	Biscontin et al. (1982)[121]	1982	X	X
Basilica S. Maria Assunta	Fassina et al. (1990)[119]	1980	X	X
Ca' Badoer	Biscontin et al. (1979)[120]	1978	X	X
	Zendri et al. (2020)[140]	2019		
Ca' Bottacin	Zendri et al. (2020)[140]	2019	X	
Ca' Foscari	Biscontin et al. (1982)[121]	2019	X	
	Zendri et al. (2020)[140]			
Ca' Pesaro	Fassina et al. (1990)[119]	1990	X	
Ca' Tron	Zendri et al. (2020)[140]	2019	X	
Ca' Venier	Biscontin et al. (1982)[121]	1982	X	X
Chiesa S. Antonin	Arcadia Ricerche (2015)	2004-2014	X	
Chiesa S. Clemente	Arcadia Ricerche (2005)	2000-2005	X	
Chiesa S. Maria dei Miracoli	Fassina et al. (1990)[119]	1989	X	
Ex-chimica industriale	Biscontin et al. (1982)[121]	1982		X
Ex-convento dei Tolentini	Riva et al. (1999)[139]	1997		X
		1998		
Corderie dall'Arsenale	Riva et al. (1999)[139] Fassina et al. (2002)[112]	1997	X	X
		2000		
Ex-cotonificio S. Marta	Biscontin et al. (1982)[121]	1982		X
Palazzo Balbi	Albanesi et al. (1982)[138]	1982	X	X
Palazzo Malipiero	Zendri et al. (2020)[140]	2019	X	
Palazzo Zorzi	Apih et al. (1993)[135]	1987		X
S. Giobbe	Riva et al. (1999)[139]	1997-1998		X
	Zendri et al. (2020)[140]	2019		

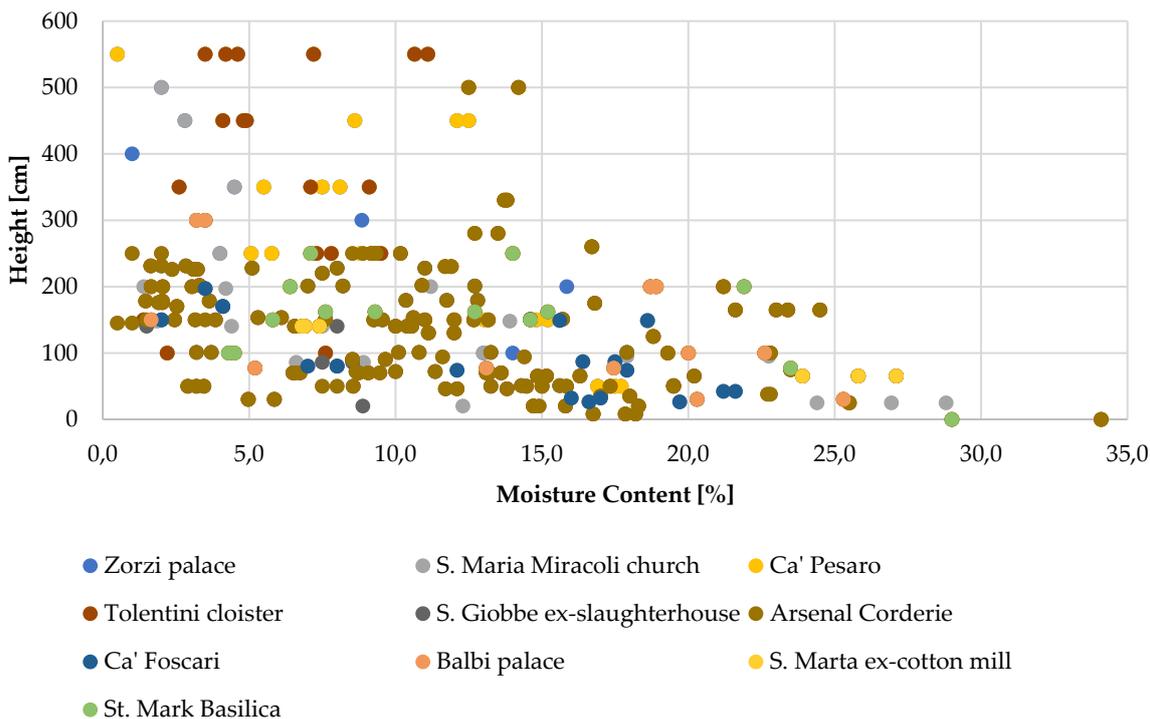


Figura 25. Relazione tra MC% e altezza di campionamento [cm] in alcuni casi studio di edifici Veneziani.

Tabella 18. Correlazione contenuto d'acqua nelle murature e livelli di marea.

Anno	MC [%]	Marea max [cm]	N. dati
1978 – 1987	+ 14.50	+ 4.00	107
1988 – 1997	- 5.60	+ 21.00	55
1998 – 2007	+ 2.80	+ 8.00	108
2008 – 2019	+ 0.90	+ 70.00*	71

\* si esclude la marea eccezionale del 2019

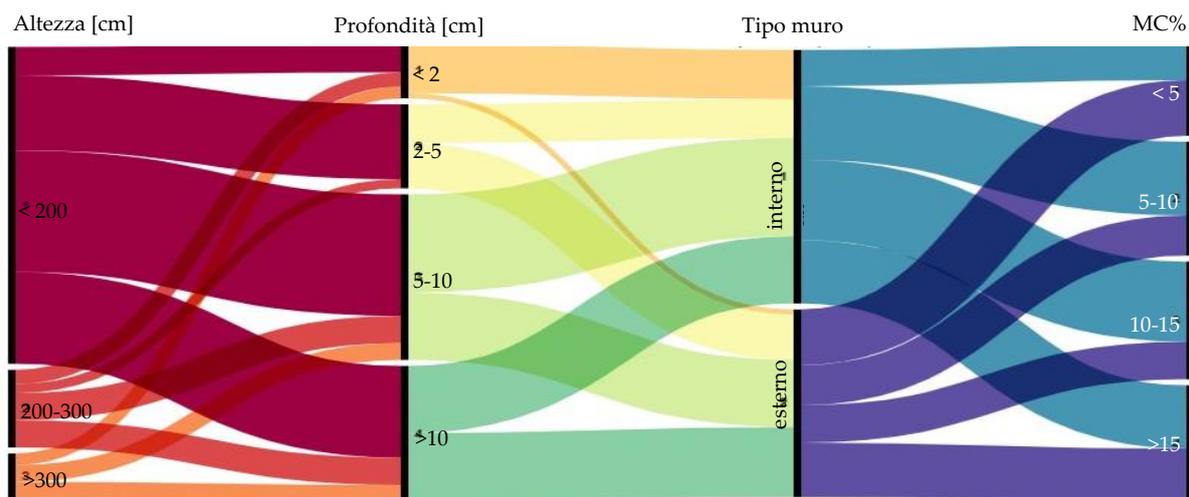


Figura 26. Diagramma di flusso con "feature selection" per la risalita capillare a Venezia.

Di seguito si riportano i grafici che mettono in relazione contenuto di umidità (MC [%]) e altezza di campionamento [cm] su due casi studio specifici, di cui si hanno notevoli dati: le Corderie dell'Arsenale (Figura 27) e il chiostro dell'ex-Convento dei Tolentini (Figura 28). In

entrambi i casi si nota un contenuto di umidità più elevato (fino a un massimo del 35%) ad altezze contenute (< 100 cm). Superando l'altezza di 100 cm, più difficilmente si trovano valori del contenuto umido superiori al 20%, se non qualche caso puntuale, mettendo ben in evidenza la proporzionalità inversa tra questi due parametri. Se non si ha a disposizione un elevato numero di campionamenti è più difficile osservare questo tipo di proporzionalità.

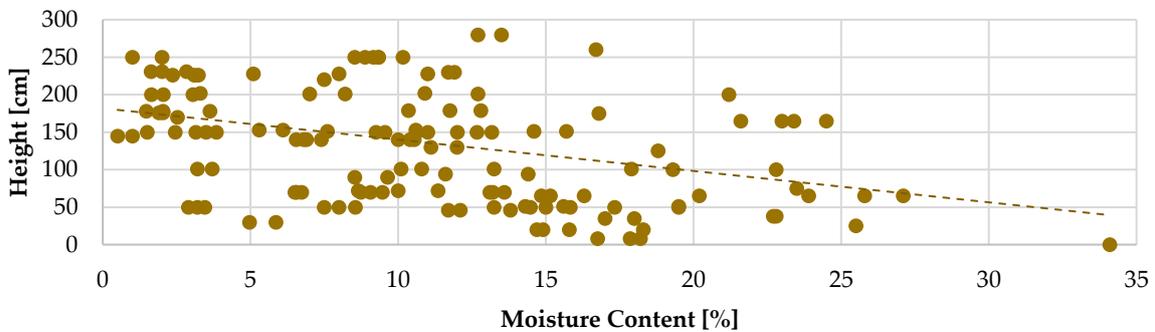


Figura 27. Relazione tra MC% e altezza di campionamento [cm] presso le Corderie dell'Arsenale.

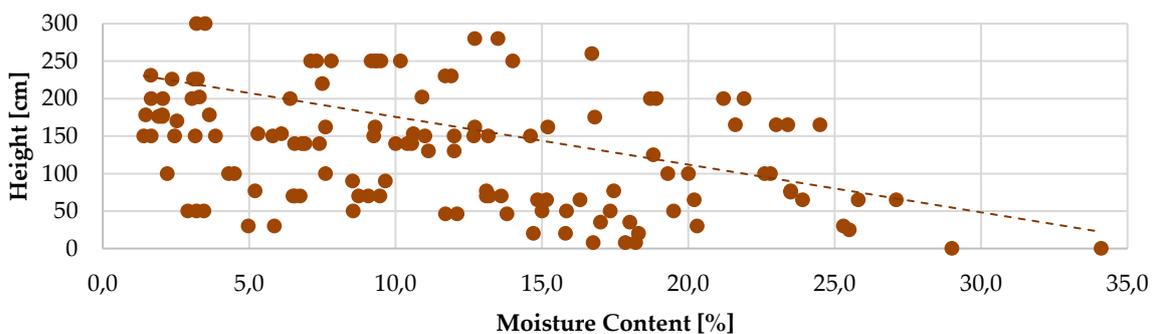


Figura 28. Relazione tra MC% e altezza di campionamento [cm] presso l'ex-Convento dei Tolentini (chostro).

### 5.3 Sistemi storici di controllo della risalita capillare

Dal XVI secolo la regolazione delle dinamiche lagunari fu posto sotto il controllo del Magistrato alle acque, con l'introduzione di interventi a livello ambientale (deviazione corsi dei fiumi, bonifica terreni paludosi ecc.), urbano (rinforzo muri di sponda, innalzamento pavimentazioni) e edilizio (dispositivi di contrasto alla risalita).

I vari sistemi storicamente adottati per limitare la risalita e nascondere il degrado provocato dal fenomeno dell'"acqua alta" (barriere impermeabili, rivestimenti con lastre marmoree, zoccolature in cemento, applicazioni interne di contropareti con pannelli di legno, cartoni bitumati o cartongesso), hanno solo aggravato il fenomeno di risalita capillare, limitando la naturale traspirazione del laterizio e innalzando il livello di umidità.

Tale fenomeno si è verificato anche con l'applicazione di intonaci macro-porosi additivati con perlite che, nonostante l'aumento della velocità di evaporazione, in alcuni casi hanno provocato una maggior concentrazione di Sali; inoltre, la loro durabilità risulta limitata nell'aggressivo ambiente lagunare. Da non sottovalutare è l'impatto visivo che provocano, in quanto, lo spessore notevole richiesto nella stesura necessario al funzionamento, altera il rapporto tra rivestimento e rilievo architettonico; per tale motivo la pratica sostitutiva molto

diffusa negli ultimi anni è la rimozione dell'intonaco nella parte basamentale, facendo coincidere il "taglio" orizzontale con una cornice marcapiano (Figura 29).

Negli edifici più prestigiosi si provvedeva posizionato uno speciale strato di pietra naturale, la pietra d'Istria, sia per elementi di superficie che strutturali. Tra le altre pietre utilizzate con la medesima funzione erano la pietra rossa di Verona, i marmi cristallini di Carrara o greci, caratterizzate dallo stesso componente principale rappresentato dal carbonato di calcio, ma che mostrano tra loro evidenti diversità strutturali o di tessitura e differiscono nel degrado sotto azione esterna. Infine, altri metodi utilizzati per contrastare il fenomeno nelle costruzioni veneziane, in cui la tessitura muraria non presenta elementi di pregio storico-architettonico, consistevano nel posizionamento di mattoni molto cotti/vetrificati nella parte basamentale delle murature (caratterizzati da una buona idrorepellenza), la sostituzione meccanica di elementi danneggiati (con differenti consistenze murarie e quindi anche problemi di tipo strutturale) o l'applicazione di fogli in piombo/bitume/pvc tra due strati di malta di calce idraulica, ottenendo un buon isolante con ottime proprietà dielettriche, inerzia chimica e resistenza alla compressione [69].



Figura 29. A sinistra, intonaco macro-poroso che altera la percezione delle modanature in facciata; a destra, rimozione dell'intonaco nella parte basamentale dell'edificio.



## 6. Caratterizzazione materiali da costruzione Veneziani

*Per quanto riguarda l'analisi della risalita capillare "in situ" esistono moltissime ricerche condotte fino a questo momento. Tali studi hanno però un limite fondamentale: non è sempre possibile avere una conoscenza profonda del substrato relativamente le sue caratteristiche chimico-fisiche, parametri che possono influenzare la lettura e l'interpretazione dei dati.*

*L'obiettivo di questo capitolo è quello di analizzare il fenomeno di risalita in condizioni controllate e limitandone le variabili al contorno. Sono quindi stati realizzati dei campioni di muratura a scala reale in laboratorio, per simulare i processi di suzione ed evaporazione che avvengono nelle strutture soggette ad umidità e individuarne le peculiarità fisiche. I materiali costruttivi scelti rispecchiano le componenti principali delle murature tradizionali veneziane, con origine e composizioni differenti: mattone, malta e intonaco.*

## 6.1 Mattone industriale da restauro

I mattoni industriali utilizzati per nel settore del restauro (Figura 30, Tabella 19 e Tabella 20), prodotti dalla cottura di argille locali a 950°C, hanno dimensioni UNI 12 x 25 x 5.5 cm. Tra i composti presenti nel materiale, derivanti dall'argilla di composizione, è possibile individuare silicati, quarzo, caolinite, wollastonite ed ematite, ma nessuna presenza di carbonati (fonte UniVe).



Figura 30. Mattone industriale.

Tabella 19. Prestazioni tecniche dichiarate mattone industriale - Specifica Tecnica Armonizzata [142] ( $\rho$  = densità,  $\sigma$  = resistenza a compressione, CI = coeff. di imbibizione,  $\lambda$  = conducibilità termica) e misurate presso il laboratorio FisTec.

Specifiche tecniche	U.M.	Dichiarato	Misurato (Lab)
<i>Dimensioni</i>	mm	250 x 120 x 55	248 ± 1 x 119 ± 2 x 53 ± 0.7
$\rho_{apparente}$	kg/m <sup>3</sup>	1560	1581 ± 56
$\sigma_{media}$	N/mm <sup>2</sup>	18	20.6 ± 4.8
CI	%	22	21 ± 0.4
$\lambda_{10,dry}$	W/mK	0.369	0.345

Tabella 20. Composizione chimica dei maggiori elementi espressi in % in peso (LOI = perso all'accensione) e mineralogica dei maggiori elementi (++++ molto abbondante, +++ abbondante, ++ medio, + scarso, +/- raro, - non rilevato) [143] mattone industriale.

Composizione	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	LOI
<b>Chimica</b>	63.79	15.28	5.16	0.11	2.87	7.01	0.99	3.20	0.66	0.13	0.78
	<b>Qz</b>	<b>I</b>	<b>Chl</b>	<b>Kfs</b>	<b>Pl</b>	<b>Cal</b>	<b>Dol</b>	<b>Hem</b>	<b>Wo</b>	<b>Di</b>	<b>Gh</b>
<b>Mineralogica</b>	++++	-	-	+	++	-	-	+	+	+/-	+/-

### 6.1.1 Dimensioni lineari

Per la determinazione delle dimensioni lineari [mm] medie del mattone [144] si è proceduto alla misurazione di ciascuna dimensione mediante calibro (precisione ± 0.02 mm). Sono state ricavate due misure: lunghezza  $l_u$ , larghezza  $w_u$  e altezza  $h_u$ , date dalla media aritmetica delle misure effettuate.

### 6.1.2 Massa fisiologica

La misura della massa fisiologica  $m_f$  è stata ottenuta essiccando il provino di mattone in forno a  $T = 105^\circ\text{C}$  e pesando il campione ogni 24 ore, con bilancia analitica (sensibilità 0.01 g), affinché la variazione della massa del campione risulti  $< 0.1\%$  [145]; il risultato è pari a  $2517 \pm 17$  g. Tale grandezza rappresenta la massa del campione all'equilibrio termodinamico con l'ambiente standard: questo implica che un materiale da costruzione ha un contenuto di umidità maggiore di zero (tasso di umidità naturale), dipendente da eventuali Sali contenuti dall'aria che lo circonda. Nei materiali da costruzione il contenuto di umidità fisiologica è compreso nel range 1 – 3%.

### 6.1.3 Densità e porosità

La densità apparente  $\rho$  [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ] [145], [146] è data dal rapporto tra la massa del campione secco  $m$  [kg] ed il suo volume totale  $V$  (compreso dei pori) [ $\text{m}^3$ ]:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (22)$$

Il valore della massa è ottenuto mediante pesatura del campione (§ 6.1.2). Il volume totale, compreso dei pori, è stato determinato mediante la misurazione delle dimensioni del provino con calibro (accuratezza della misura  $\pm 5\%$  [144]).

La densità reale  $\rho_s$  [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ] è data dal rapporto tra la massa del campione secco ed il volume della sola parte solida. Per questo parametro è possibile utilizzare il principio di Archimede (pesata idrostatica): un solido immerso in un liquido viene sottoposto ad una spinta, il cui valore è pari al peso del liquido spostato dal volume solido (Figura 31). Conoscendo la densità del liquido (acqua) in cui è immerso il solido (mattone) è possibile determinarne il peso specifico:

$$\rho_s = \frac{W_a - \rho_w}{W_a - W_w} = 2267 \pm 250 \quad (23)$$

Dove:

$W_a$  è il peso del solido in aria [g],  $W_w$  è il peso del solido immerso in acqua [g],  $\rho_w$  è la densità del liquido (per l'acqua pari a  $1 \text{ g}/\text{cm}^3$ ).

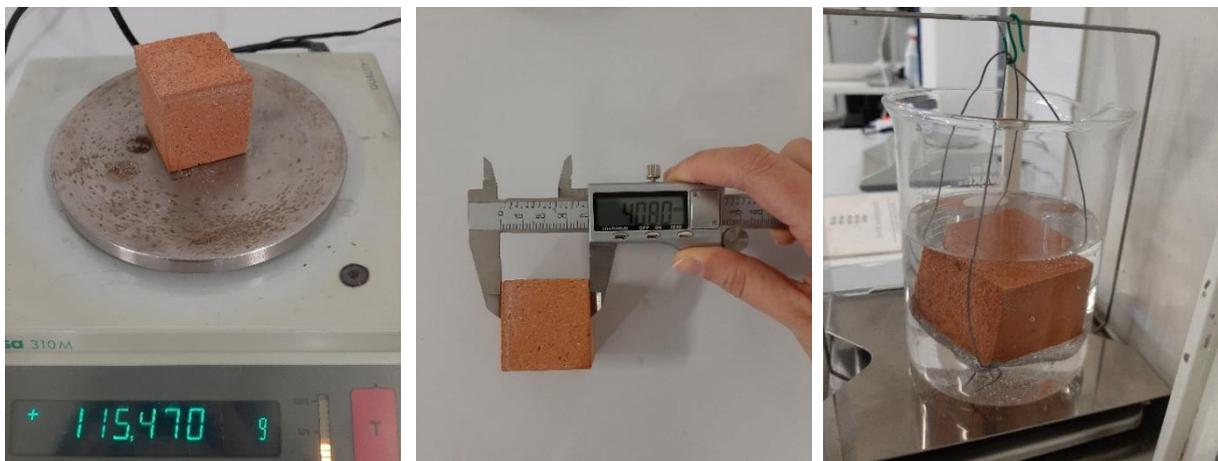


Figura 31. Da sinistra: pesatura provino di mattone, misurazione dimensioni con calibro e pesatura idrostatica.

È inoltre possibile determinare la porosità aperta  $\varphi_o$  [%] ossia la percentuale volumetrica dei pori nel campione, comunicanti con l'esterno, a partire dal volume del campione, calcolato mediante pesata idrostatica:

$$\varphi = \frac{V - V_{nu}}{V} \cdot 100 \quad (24)$$

Dove:

$V$  è il volume geometrico del campione [ $\text{cm}^3$ ],  $V_{nu} = \frac{M_{au} - M_{wu}}{\rho_w}$  è il volume netto del provino [ $\text{cm}^3$ ],  $M_{au}$  è la massa umida del provino misurata in aria dopo immersione in acqua di almeno 2 ore [g],  $M_{wu}$  è la massa apparente del provino misurata in acqua mediante pesata idrostatica dopo immersione di almeno 2 ore [g],  $\rho_w$  è la densità del liquido (per l'acqua pari a  $1 \text{ g/cm}^3$ ).

Tale sperimentazione è stata eseguita su n. 10 provini di mattone di dimensioni  $40 \times 40 \times 40 \pm 2$  mm (Tabella 21).

Tabella 21. Densità e porosità aperta determinati con pesata idrostatica, mattone industriale.

Densità apparente $\rho$ [ $\text{kg/m}^3$ ]	Densità reale $\rho_s$ [ $\text{kg/m}^3$ ]	Porosità aperta $\varphi$ [%]
$1581 \pm 56$	$2243 \pm 124$	$42 \pm 5$

Altro metodo di determinazione della porosità effettiva e della distribuzione dimensionale dei pori è l'utilizzo di un porosimetro a mercurio MIP [147]. Il metodo si basa sul principio dell'intrusione del mercurio nella struttura del materiale, grazie all'imposizione di una pressione esterna che consente al liquido di penetrare nei pori più piccoli. La relazione di Washburn esprime il rapporto tra pressione esercitata  $P$  [ $\text{N/m}^2$ ] e raggio dei pori:

$$P = \frac{2 \gamma \cos\theta}{r} \quad (25)$$

Dove:

$\gamma$  è la tensione superficiale del mercurio (liquido con angolo di contatto  $> 90^\circ$ ) [ $\text{N/m}$ ],  $\theta$  è l'angolo di contatto del sistema mercurio/aria,  $r$  è il raggio dei pori [ $\mu\text{m}$ ].

Tale sistema può essere affetto da errori, in quanto si assume che il materiale indagato abbia una geometria dei pori regolare, ma può fornire indicazioni quantitative molto utili sulla macro e meso porosità di un campione. In Tabella 22 si riportano i dati elaborati dal gruppo di ricerca di UniVe.

Tabella 22. Risultati analisi porosimetrica mattone S. Marco, UniVe (porosimetro Pascal 140 e Pascal 240 ThermoFisher).

Vol cum [ $\text{mm}^3/\text{g}$ ] *	$\rho$ [ $\text{g/cm}^3$ ]	$\varphi_o$ [%] *	Tipo distribuzione	Raggio medio pori [ $\mu\text{m}$ ]
$219 \pm 20$	1,7	$37 \pm 2$	monomodale	0,6

#### 6.1.4 Assorbimento d'acqua capillare

*«Quando si bagna una pietra, se assorbe rapidamente l'acqua ed aumenta di peso, essa è poco propria a resistere all'umidità»<sup>26</sup>*

La risalita dell'acqua all'interno degli elementi murari rappresenta il movimento dei fluidi dovuto alle caratteristiche tessiturali e porosimetriche, legami chimici e forze di adsorbimento (viscosità, densità e tensione superficiale nel liquido, § 1.2.1).

I processi di risalita capillare sono stati qui analizzati nella loro evoluzione e cinetica di assorbimento mediante determinazione dell'altezza del fronte di risalita capillare nel tempo, in diverse configurazioni sperimentali [26]. Questo è necessario per evidenziare il comportamento base dei laterizi all'assorbimento d'acqua; è il primo punto di partenza per una valutazione delle cinetiche nei modelli più complessi di muratura. Le configurazioni comprendono: (i) provini 4 x 4 x 4 cm, (ii) singoli mattoni, (iii) mattoni sovrapposti, con interposto panno assorbente o spugna per simulare i giunti di malta, (iv) gruppi di mattoni. Tali campioni sono stati posti a diretto contatto con uno strato d'acqua su un lato di essi, per assicurare l'assorbimento.

In tutte le configurazioni sperimentali (Tabella 23) provate si osserva un rapido assorbimento d'acqua nei momenti iniziali di suzione (prime 2 ore), corrispondente ad un aumento del contenuto d'acqua nel campione e un repentino aumento del fronte di risalita. Alcune differenze sul fronte di risalita si notano sui provini (i), dimostrando delle direzioni preferenziali di assorbimento, correlate alla lavorazione delle facce. Nel caso (iii) si nota una difficoltà di avanzamento oltre l'interfaccia, a causa della discontinuità di contatto della struttura, portando ad una saturazione totale solamente nel mattone alla base. In generale, la velocità di risalita è direttamente proporzionale all'area di suzione e inversamente proporzionale all'area di evaporazione; infatti, una maggior area di contatto con il substrato umido porta a un forte aumento della velocità di risalita capillare, al contrario, maggiore è l'area di evaporazione minore sarà il flusso di liquido assorbito.

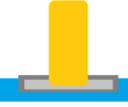
In seguito, si raggiunge una fase di stabilizzazione (condizioni al contorno costanti durante la prova).

Per determinare il coefficiente di assorbimento capillare (CA) e la quantità totale di acqua che il mattone può assorbire nel tempo  $t$  per unità di superficie [g/m<sup>2</sup>][27], [148] si è eseguito un test su 10 provini di mattone (40 x 40 x 40 ± 2 mm), precedentemente essiccati in forno a T = 60°C per ottenere una massa costante, affinché la variazione di peso nell'arco di 24 h risulti < 0.1% [6]. Successivamente, il provino è stato posato in acqua dolce mantenendo il livello del liquido costante a circa 1 mm (Figura 32), mantenendo costante il microclima (T = 22 ± 2°C, RH = 50 ± 10 %) affinché si limiti il processo di evaporazione superficiale. Ad intervalli di tempo definiti (1-3-5-10-15-30 min, 1-2-4-8-24 h) il provino viene pesato, previa asciugatura, per registrare il livello di acqua assorbita. L'operazione viene ripetuta fino a quando l'assorbimento fra due pesate successive risulta essere < 1% della massa.

---

26 Jean Baptiste Rondelet, *Traité théorique et pratique de l'art de bâtir*, Libro I, Capo I

Tabella 23. Parametri relativi alle configurazioni di mattone industriale analizzate (H= altezza media risalita capillare, T= tempo, Vt= velocità risalita capillare, S<sub>ass</sub>= area di assorbimento d'acqua, Q<sub>v</sub>= portata volumetrica).

Config.	H [cm]	T [min]	Vt=H/T [cm/min]	S <sub>ass</sub> [cm <sup>2</sup> ]	Q <sub>v</sub> =Vt*S <sub>ass</sub> [cm <sup>3</sup> /min]
 Cub 15	2.3	22	104*10 <sup>-3</sup>	16.0	1.66
	2.8	22	126*10 <sup>-3</sup>	16.0	2.02
	2.2	30	72.6*10 <sup>-3</sup>	16.0	1.16
 Cub 20	2.4	30	79.6*10 <sup>-3</sup>	16.0	1.27
	1.7	14	125*10 <sup>-3</sup>	16.0	2.00
	2.2	14	155*10 <sup>-3</sup>	16.0	2.48
 C1	2.8	26	107*10 <sup>-3</sup>	300.0	32.10
 C2	3.5	26	134*10 <sup>-3</sup>	300.0	40.20
 C3	7.4	279	26.6*10 <sup>-3</sup>	66.0	1.76
	7.9	279	28.4*10 <sup>-3</sup>	66.0	1.87
 C4	1.8	237	7.59*10 <sup>-3</sup>	300.0	2.27
	2.4	237	10.0*10 <sup>-3</sup>	300.0	3.00
 C11	1.9	233	7.94*10 <sup>-3</sup>	300.0	2.38
 C12	2.3	233	9.91*10 <sup>-3</sup>	300.0	2.97

La quantità di acqua assorbita dal campione  $Q_i$  [g/cm<sup>2</sup>] si determina con la formula:

$$Q_i = \frac{m_i - m_0}{S} = 13.52 \pm 0.38 \quad (26)$$

Dove:

$m_i$  è la massa del campione bagnato al tempo  $t_i$  [g],  $m_0$  è la massa del campione essiccato [g],  
 $S$  è la superficie del campione a contatto con il liquido [cm<sup>2</sup>].

I valori permettono di costruire la curva di assorbimento capillare, che esprime la quantità di acqua assorbita dall'unità di superficie in funzione di  $\sqrt{t}$  (Figura 32). Il coefficiente angolare del tratto rettilineo della curva definisce il coefficiente di assorbimento capillare  $CA$  [g/cm<sup>2</sup> · s<sup>1/2</sup>], determinato come segue:

$$CA = \frac{M^*}{\sqrt{t^*}} = 0.024 \pm 0.003 \quad (27)$$

Dove:

$M^*$  è il valore asintotico della quantità di acqua assorbita dal campione per unità di superficie [ $\text{g}/\text{cm}^2$ ],  $t^*$  è l'ascissa del punto di intersezione fra la retta passante per l'asintoto e la tangente al tratto rettilineo della curva [ $\text{s}^{1/2}$ ].

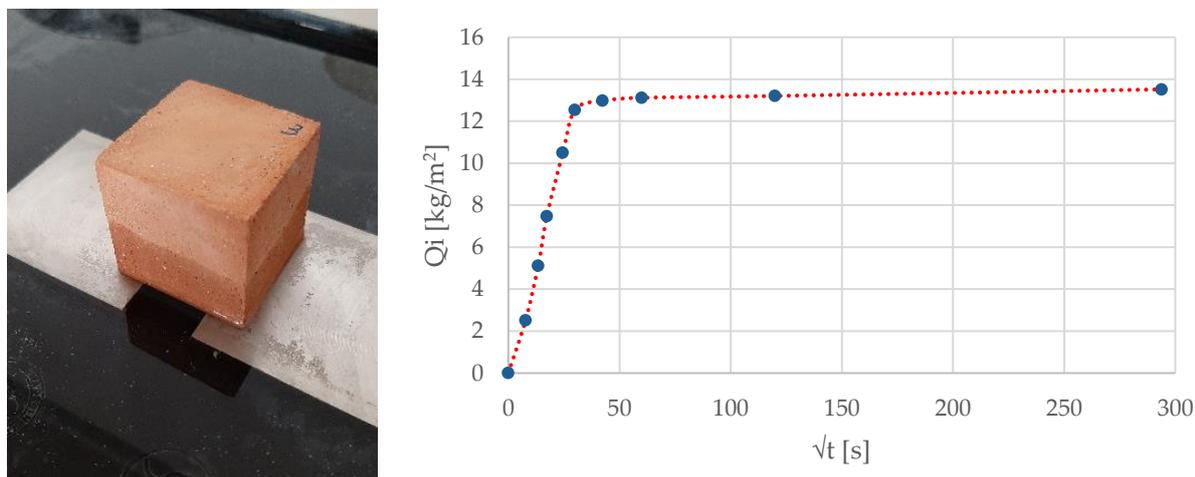


Figura 32. Prova di assorbimento capillare su provino di mattone industriale; a sinistra: test su provino; a destra: curva di assorbimento capillare media tra 10 provini.

È stato inoltre valutato il livello di risalita capillare mediante termografia IR (distanza dall'oggetto osservato  $\sim 1$  m,  $\varepsilon = 0.95$ , microclima  $T = 19 \pm 2$  °C,  $RH = 48 \pm 7$  %), eseguite ad intervalli di tempo regolari su mattoni UNI  $25 \times 12 \times 5.5$  (ogni minuto per le prime 6 h, ogni 10 minuti per le successive 6-8 h), fino al raggiungimento della saturazione di acqua da parte del mattone intero. La prova è stata eseguita su (a) singolo mattone, (b) due mattoni sovrapposti con interfaccia di carta assorbente per favorire una maggior aderenza tra le superfici e (c) su un campione di mattone di lunghezza 40 cm. La completa imbibizione in (a) si raggiunge mediamente intorno alle 14-15 h, ossia quando l'immagine termografica mostra una temperatura superficiale più bassa rispetto all'ambiente circostante, corrispondente ad una zona umida in cui si verifica evaporazione superficiale (in Figura 33 si può notare la zona di evaporazione rappresentata con un colore blu-viola). La risalita è molto rapida e costante nelle prime due ore, fino ad un'altezza pari a circa 10-12 cm (velocità massima di risalita 2 cm/h), con un andamento decrescente nelle ore successive, fino a saturazione completa (Tabella 24). In (b) la completa saturazione si raggiunge solamente nel mattone alla base, mentre il mattone sovrastante raggiunge l'equilibrio a circa metà della sua altezza. Infine, in (c) la saturazione completa del manufatto avviene dopo circa 30 h (Figura 34).

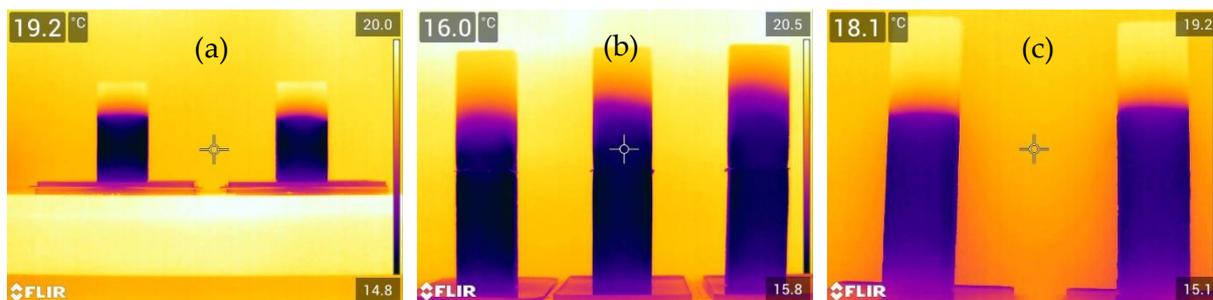
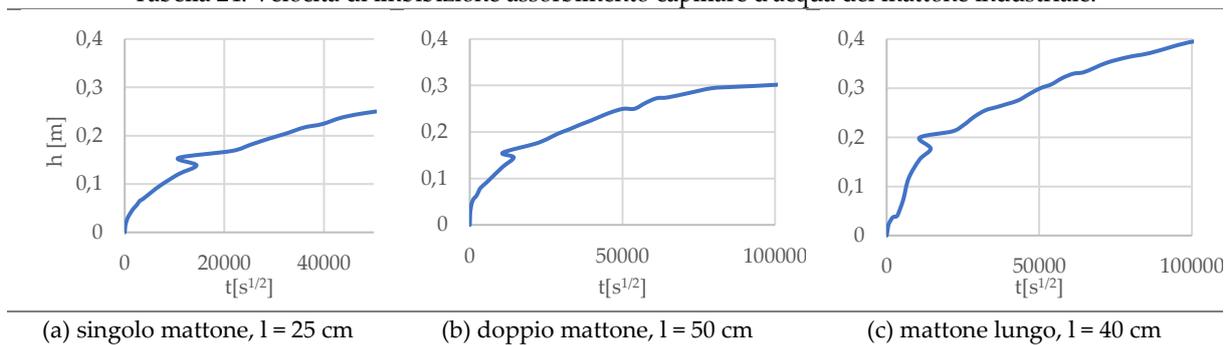


Figura 33. Prova di assorbimento capillare su mattoni industriali: (a) singolo mattone,  $l = 25$  cm; (b) doppio mattone sovrapposto,  $l = 50$  cm; (c) mattone lungo,  $l = 40$  cm.

Tabella 24. Velocità di imbibizione assorbimento capillare d'acqua del mattone industriale.



(a) singolo mattone,  $l = 25$  cm

(b) doppio mattone,  $l = 50$  cm

(c) mattone lungo,  $l = 40$  cm

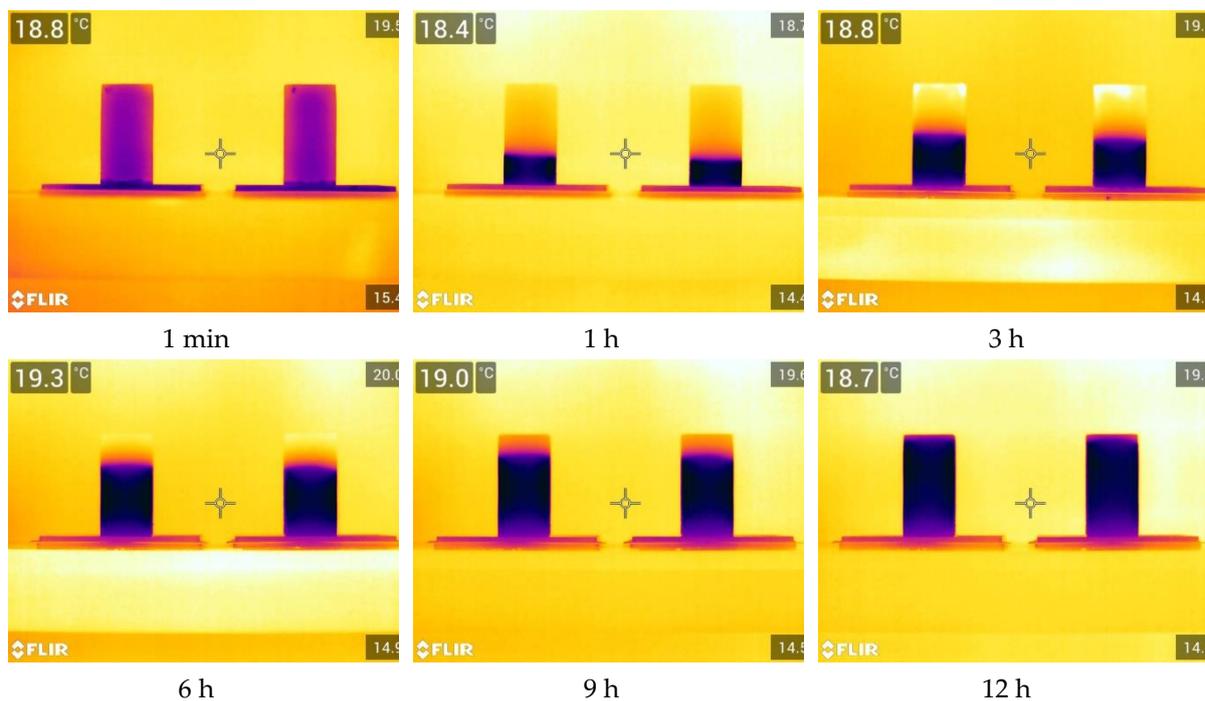


Figura 34. Prova di assorbimento risalita capillare su mattone industriale.

### 6.1.5 Assorbimento d'acqua per immersione totale

La prova permette di determinare la quantità d'acqua assorbita dal materiale a pressione atmosferica. Viene eseguita su 10 provini di mattone ( $4 \times 4 \times 4$  cm) precedentemente essiccati in forno a  $T = 60^\circ\text{C}$  fino ad ottenere una massa costante, affinché la variazione di peso nell'arco di 24 h risulta  $< 0.1\%$  [149], [150]. Il materiale è stato quindi immerso in acqua deionizzata e ad

intervalli di tempo regolari (1-3-5-10-15-30 min, 1-2-4-8-24 h); successivamente, ogni 24 h fino al raggiungimento della massa costante, sono stati pesati con bilancia analitica (sensibilità 0.01 g), previa tamponatura con panno umido. Al termine i provini sono stati nuovamente essiccati e pesati per determinare il peso finale (Figura 35).

Con questa prova è possibile determinare la capacità di imbibizione d'acqua a pressione atmosferica  $CI$  [%]:

$$CI = \frac{M_{max} - M_{of}}{M_{of}} \cdot 100 = 21 \pm 0.4 \quad (28)$$

Dove:

$M_{max}$  indica la massa del campione imbibito d'acqua alla fine della prova [g],  $M_{of}$  indica la massa del campione essiccato alla fine della prova [g].

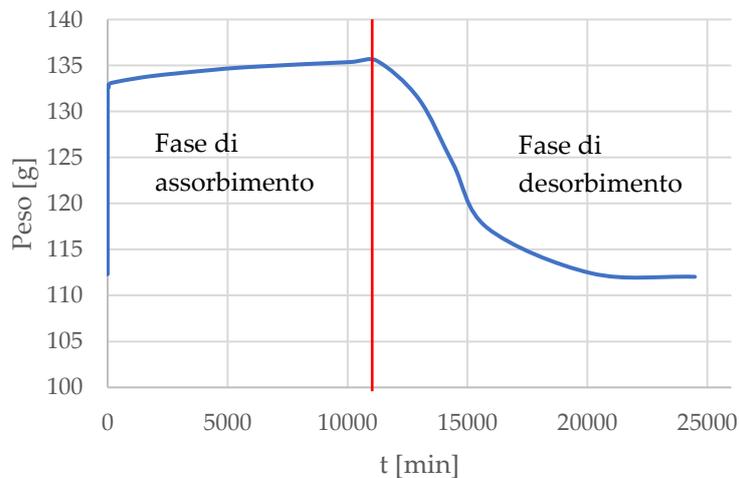


Figura 35. Grafico di assorbimento e desorbimento del mattone industriale (valore medio su 10 provini).

### 6.1.6 Conduttività termica

Per la determinazione della conduttività termica (Tabella 25 [151], [152]) è stata utilizzata una doppia piastra con anello di guardia (Taurus TLP-800, Figura 36) in cui sono stati inseriti 15 mattoni, previa essiccazione in forno a  $T = 105 \text{ }^\circ\text{C}$ .



Tabella 25. Determinazione conduttività termica mattone industriale.

Misurazione	T media [°C]	$\lambda$ [W/mK]
1	13.5	0.347
2	23.4	0.361
3	33.3	0.369
Media	10	0.345

Figura 36. Misurazione conducibilità termica mattone industriale mediante doppia piastra con anello di guardia.

### 6.1.7 Resistenza a compressione

Tale prova consente di determinare la resistenza che il materiale oppone alle sollecitazioni che tendono a schiacciarla [153], [154].

Il test è stato eseguito su campioni di mattone (4 x 4 x 4 cm), sottoposto a tre misurazioni ognuno, mediante pressa meccanica universale rigida con carico uniformemente distribuito, incrementandolo in modo continuo fino a rottura.

Il valore di resistenza a compressione  $\sigma$  [N/mm<sup>2</sup>] è dato dal rapporto tra il carico di rottura del provino e l'area della sezione trasversale sottoposta al carico:

$$\sigma = \frac{F}{A} = 20.6 \pm 4.8 \quad (29)$$

Dove:

$F$  indica il carico di rottura [N],  $A$  è l'area della sezione trasversale del provino [mm<sup>2</sup>].

## 6.2 Mattoni di recupero



Figura 37. Mattone di recupero periodo ottocentesco.

I mattoni di recupero utilizzati per la costruzione di due modelli in muratura sono risalenti al periodo Ottocentesco (Figura 37), ma probabilmente di diversa origine, composizione, texture, dimensioni e stato di conservazione. Mediante analisi visiva è possibile notare come la superficie dei mattoni stessi sia simile, ma non uguale uno all'altro; alcuni di questi hanno un aspetto chiaro, perché cotti a temperature più basse (detti "albese") e sono più permeabili; altri, di colore scuro (detti "ferrino"), cotti in forno ad elevate temperature, mostrano una

superficie liscia, poco porosa e impermeabile all'acqua, che provoca una perdita di elasticità e lo sviluppo di elevata resistenza meccanica. Abbondante è la presenza di argille silico-alluminate (feldspati e quarzo) e variabile la quantità di carbonati, ematite, ossidi di ferro e quarzo. Le argille utilizzate nella realizzazione di questi mattoni varia però da uno all'altro. La caratterizzazione chimico-fisica-meccanica è stata ottenuta come descritto nel § 6.1.

Tabella 26. Prestazioni tecniche mattone di recupero misurate presso il laboratorio FisTec.

Specifiche tecniche	U.M.	Misurato (Lab)
Dimensioni	mm	257 ± 4 × 123 ± 2 × 59 ± 2
$m_f$	g	3008 ± 0.4
$\rho_{apparente}$	kg/m <sup>3</sup>	1577 ± 76
$\rho_s$	kg/m <sup>3</sup>	2176 ± 95
$\varphi_o$	%	26 ± 11
$Q_i$	g/cm <sup>2</sup>	14.08 ± 1.75
CA	g/cm <sup>2</sup> ·s <sup>1/2</sup>	0.027 ± 0.003
CI	%	23 ± 3.3
$\lambda_{10,dry}$	W/mK	0.549
$\sigma_{media}$ (L faccia maggiore)	N/mm <sup>2</sup>	24.5 ± 4.8

### 6.3 Malta di calce premiscelata

La malta premiscelata utilizzata per la costruzione dei modelli è di calce idraulica naturale tipo strutturale classe M5, con spessore dei giunti ~ 1 cm, di due tipologie: NHL 5 (Tabella 27 [25]) e NHL 3.5 (Tabella 28).

I composti prevalentemente presenti al loro interno (Figura 38) sono silicato bicalcico, carbonato di calcio (36% nella malta NHL 3.5, 62% nella malta NHL 5), idrossido di calcio, silicato tricalcico (tipico del cemento), solfati (monosulfoalluminato, ettringite) e additivi idrorepellenti.

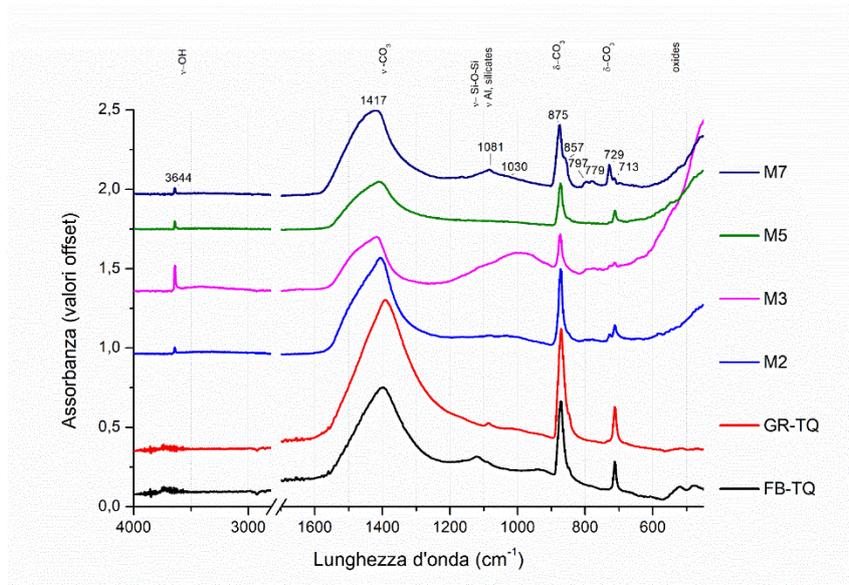


Figura 38. Analisi FT-IR delle malte ad un mese di maturazione, FB-TQ utilizzata in M1, M2; GR-TQ per M1-M6; M2 intonaco; M3 cocciopesto, M5 marmorino; M7 malta di allettamento per i muretti M7-M10 (fonte UniVe).

Tabella 27. Prestazioni tecniche dichiarate malta di calce NHL 5 - Specifica Tecnica Armonizzata UNI EN UNI EN 998-2 ( $\rho$  = densità,  $\varnothing$  = diametro pori,  $\sigma$  = resistenza a compressione,  $\mu$  = permeabilità al vapore acqueo,  $\lambda$  = conducibilità termica) e misurate presso il laboratorio FisTec.

Specifiche tecniche	U.M.	Dichiarato	Misurato (Lab)
$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	1550	2090
$\varphi$	%	-	20 ± 2
$\varnothing_{medio}$	µm	< 3	0.04-0.8
$\sigma$	N/mm <sup>2</sup>	> 6.0	3.18 ± 0.8
Resistenza a flessione	N/mm <sup>2</sup>	-	0.56 ± 0.1
$Q_i$	g/cm <sup>2</sup>	-	16.51 ± 8.27
CA	kg/m · min <sup>0.5</sup>	< 0.3	0.02 ± 0.03
CI	%	-	12.60 ± 0.20
$\mu$	-	15/35	4.75 ± 0.4
$\lambda_{10,dry}$	W/mK	0.920	0.588

Tabella 28. Prestazioni tecniche dichiarate malta di calce NHL 3.5 - Specifica Tecnica Armonizzata UNI EN UNI EN 998-2 ( $\sigma$  = resistenza a compressione,  $\rho$  = densità,  $\mu$  = permeabilità al vapore acqueo,  $\lambda$  = conducibilità termica) e misurate presso il laboratorio FisTec.

Specifiche tecniche	U.M.	Dichiarato	Misurato (Lab)
$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	1400	1980
$\varphi$	%	-	26 ± 2
$\varnothing_{medio}$	μm	< 1.5	0.04-0.7
$\sigma$	N/mm <sup>2</sup>	≥ 10.0	6.34 ± 1.9
Resistenza a flessione	N/mm <sup>2</sup>	-	1.14 ± 0.3
$Q_i$	g/cm <sup>2</sup>	-	35.85 ± 8.20
CA	kg/m <sup>2</sup> ·min <sup>0.5</sup>	< 0.3	0.02 ± 0.02
CI	%	-	18.22 ± 3.54
$\mu$	-	15/35	4.23 ± 0.9
$\lambda_{10,dry}$	W/mK	0.820	0.774



Figura 39. Provini di malta premiscelata NHL 5 (a sinistra) e NHL 3.5 (a destra).

### 6.3.1 Assorbimento d'acqua capillare

Per determinare il coefficiente di assorbimento capillare e la quantità di acqua assorbita dalla malta nel tempo  $t$  per unità di superficie [g/m<sup>2</sup>] si è eseguito un test su 3 provini di malta (dimensioni 40 x 40 x 160 mm), stagionati a  $T = 20 \pm 2$  °C e  $RH = 50 \pm 10$  % per 28 giorni. Il provino è stato posizionato in un recipiente con acqua dolce, mantenendo il livello del liquido costante a circa 3 mm. Ad intervalli regolari definiti il provino viene pesato, previa asciugatura del campione con panno, per registrare il livello di acqua assorbita. La prova si ritiene conclusa quando per pesate successive di 24 h il peso del campione rimane costante.

La quantità di acqua assorbita dal campione  $Q_i$  ed il coefficiente  $CA$  si determinano come descritto al § 6.1.4. Si osserva che l'assorbimento capillare d'acqua nel provino di malta in entrambi i casi è molto lento e disomogeneo tra le facce esposte, determinato dal contenuto di cemento (limitato) e materiale idrofobizzante nella composizione.

### 6.3.2 Resistenza a compressione e flessione

Il test è stato eseguito su tre campioni di malta di dimensione 4 x 4 x 16 cm con le facce poste a contatto con le piastre preventivamente spianate. Ogni prisma è stato sottoposto carico di

rottura in tre punti. Dalle due parti rimanenti dopo la rottura si esegue la prova a flessione, posizionando il provino (lunghezza 45-50 mm) fra due rulli e successivamente applicato un carico a velocità costante.

Tabella 29. Determinazione del valore di resistenza a compressione a flessione delle malte premiscelate.

Campione	Resistenza a flessione [N/mm <sup>2</sup> ]	Resistenza a compressione [N/mm <sup>2</sup> ]
NHL 5	0.56 ± 0.1	3.18 ± 0.8
NHL 3.5	1.14 ± 0.3	6.34 ± 1.9

#### 6.4 Malta di calce-sabbia

Per la realizzazione di n. 4 modelli in muratura è stata utilizzata malta di calce naturale, con spessore dei giunti di allettamento pari a ~1 cm. Nella sua composizione il rapporto in volume di sabbia silicea (del "Muson", Ø 0.1-4 mm) e grassello di calce è 3:1. Il grassello ha origine dalla calce viva che viene "spenta" con abbondante acqua e poi lasciata stagionare per almeno 24 mesi. Si può trovare abbondante presenza di idrossido di calcio e una piccola percentuale di silicati.

#### 6.5 Intonaco

Il medesimo composto di malta di calce-sabbia, come descritto al § 6.4, è utilizzato per la stesura del composto a intonaco in un modello in muratura, con spessore dello strato di intonaco ~4 mm (con posa in due strati) come rivestimento superficiale.

L'intonaco di cocciopesto, realizzato artigianalmente, è composto da sabbia silicea (del "Muson", Ø 0.1-4 mm), grassello di calce spenta (stagionatura 24 mesi) e cotto macinato proveniente dalla frantumazione di coppi/mattoni (Ø 0.6 mm), con rapporto 3:1 (di cui 1 ½ di cotto e 1 ½ di sabbia: grassello). Come nella malta/intonaco di calce-sabbia, la composizione mostra abbondante presenza di silicati e idrossido di calcio, e in questo caso anche composti idraulici.

L'intonaco di marmorino realizzato artigianalmente, è composto da grassello di calce spenta (stagionatura 24 mesi) e marmo botticino in scaglia (1-3 mm), con rapporto 3:1:1 (spolverone: botticino: grassello). Anche qui la composizione è prevalente nella presenza di idrossido di calcio, ma sono assenti i silicati.

In Tabella 30 sono indicate le specifiche tecniche dei materiali appena descritti (Figura 40). Tutti i materiali contengono una elevata quantità di calcite.



Figura 40. Da sinistra, intonaco di calce e sabbia, cocciopesto e marmorino.

Tabella 30. Prestazioni tecniche intonaci misurate presso il laboratorio FisTec.

<b>Specifiche tecniche</b>	<b>U.M.</b>	<b>Calce-sabbia</b>	<b>Cocciopesto</b>	<b>Marmorino</b>
$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	1985	1660	1837
$\varphi$	%	28.21	39.52	32.84
$\varnothing_{medio}$	$\mu\text{m}$	0.004-0.8	0.004-0.8	0.004-0.7
$\sigma$	N/mm <sup>2</sup>	4.18 ± 0.4	3.52 ± 0.64	5.81 ± 1.21
<i>Resistenza a flessione</i>	N/mm <sup>2</sup>	0.17 ± 0.05	0.18 ± 0.06	0.41 ± 0.09
$Q_i$	g/cm <sup>2</sup>	25.11 ± 16.87	31.99 ± 18.41	27.85 ± 18.34
CA	kg/m·min <sup>0.5</sup>	0.01 ± 0.02	0.02 ± 0.06	0.01 ± 0.02
CI	%	13.70 ± 0.41	20.40 ± 0.38	11.34 ± 2.16
$\mu$	-	2.47 ± 0.3	2.65 ± 0.2	4.04 ± 0.3
$\lambda_{10,dry}$	W/mK	0.812	0.601	0.936

## **7. Sperimentazione in laboratorio su mock-up in muratura**

*In seguito alla realizzazione di campioni di muratura a scala reale in laboratorio, i processi di suzione ed evaporazione sono stati monitorati mediante varie tecniche diffuse in commercio, sia invasive che non invasive. Lo scopo è stato quello di individuare le aree maggiormente influenzate dalla risalita e le cause strutturali o transitorie di instabilità, in modo da poter effettuare una diagnosi e proporre delle possibili soluzioni atte a risolvere il problema mediante la stesura di un piano di manutenzione e/o restauro efficace e sostenibile.*

*Tra i sistemi di trattamento possibili, i più diffusi negli ultimi decenni sono quelli elettrofisici perché poco invasivi e quindi facilmente applicabili anche nel patrimonio storico-culturale. Alcuni di questi sono stati approfonditi e analizzati in laboratorio, valutandone l'efficacia del risultato utilizzando i modelli di muratura a scala reale.*

## 7.1 Stato dell'arte sperimentazioni umidità di risalita capillare

Per lo studio dei fenomeni fisici che governano l'umidità di risalita negli edifici storici e l'influenza che materiali e tecnologie costruttive hanno su di essi, sono stati fatti una serie di studi in laboratorio a livello mondiale, per cercare di identificare quali siano le variabili più influenti nel sistema. Tali sperimentazioni consistono in una serie di prove su modelli di muratura a scala reale, in ambiente controllato (laboratorio) e no (caso reale). La difficoltà di questi esperimenti è la durata nel tempo, in quanto richiedono da qualche mese a qualche anno di monitoraggio per poter osservare completamente i fenomeni, e l'esecuzione di più modelli per effettuare una statistica dei risultati.

Infatti, riprodurre i fenomeni di umidità da risalita in laboratorio è molto difficile, in quanto nei casi reali fondamentali sono la simultanea presenza di tre fattori particolari: (i) caratteristiche intrinseche – tipologia materiali, tecnologia costruttiva, localizzazione e orientamento edificio, variabili di occupazione interna; (ii) caratteristiche estrinseche – agenti atmosferici, clima; (iii) tempo di esposizione. Tra queste, una difficoltà deriva dal ricreare la medesima tecnologia costruttiva del passato, con gli stessi materiali tradizionali; infatti, molto spesso mancano approfondite conoscenze sul sistema costruttivo ed è difficile utilizzare gli stessi materiali del passato, ossia con le stesse performance dal punto di vista fisico. Ad esempio, le malte che si trovano negli edifici storici assumono determinate caratteristiche perché sottoposte ad un prolungato passaggio di acqua, mentre quelle fresche e recenti sono spesso caratterizzate dalla presenza di cemento o altri prodotti idrofobi, agendo come una barriera all'umidità da risalita.

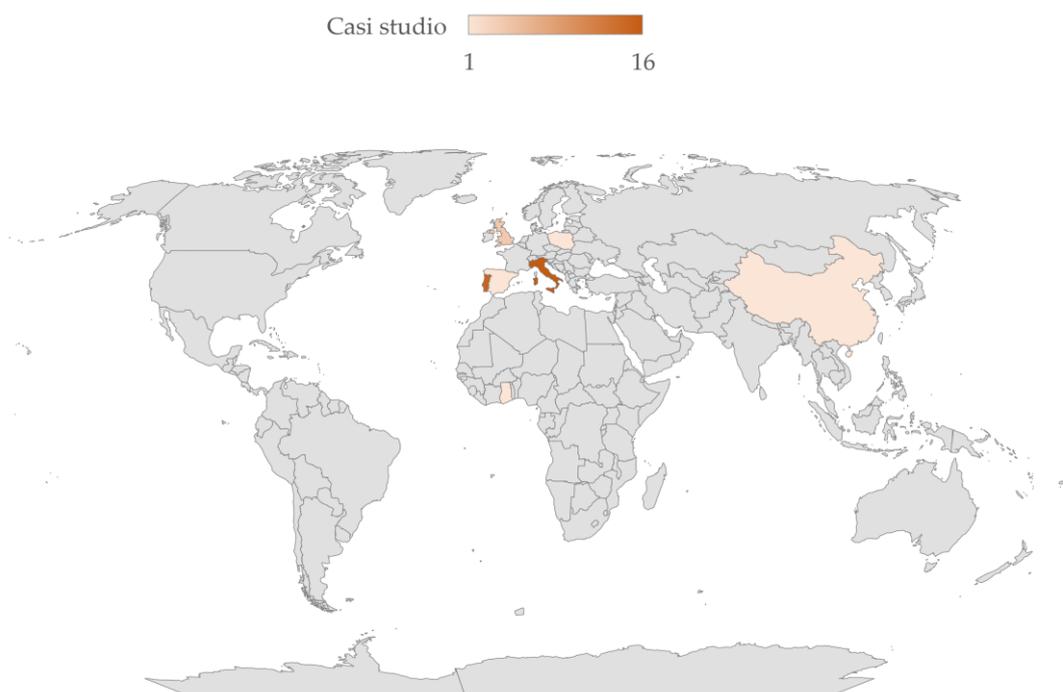


Figura 41. Distribuzione ricerche eseguite su pareti di prova in muratura a livello mondiale.

Queste motivazioni riscontrano quindi la limitata presenza di tali studi, per un totale di 16 studi (Figura 41), in alcuni casi analizzati e approfonditi più volte nel tempo, per eseguire ulteriori approfondimenti.

Tali modelli in muratura sono stati costruiti all'interno di vasche, successivamente riempite d'acqua per simulare la risalita capillare dal terreno. I materiali scelti per la costruzione sono quelli tradizionalmente utilizzati nel luogo di studio (sia di nuova produzione che di recupero da altri siti), sia per la tipologia che la tecnica costruttiva: in alcuni casi possiamo infatti osservare murature "a vista" e in altri casi rivestite con intonaco.

Per la valutazione del fenomeno di risalita sono stati monitorati i parametri microclimatici interni e climatici esterni (T/RH) e la temperatura superficiale del modello in esame, il contenuto salino in acqua e nella parete; sono state utilizzate differenti tecniche di diagnosi, invasive e non invasive.

In generale, tali test hanno dimostrato come la risalita capillare in questo tipo di costruzioni si assesti intorno ai 50-60 cm di altezza dalla base (per mattoni con  $\varphi_{avg} = 30\%$ ), con una quantità media di acqua assorbita pari a circa il 2.5% rispetto ad una parete di riferimento. L'assorbimento di acqua determina nella struttura una diminuzione della resistenza meccanica e quindi una perdita di equilibrio statico, ed un conseguente aumento di conduttività nelle aree inferiori, con perdita di isolamento termico.

In Appendice A si riportano nel dettaglio una serie di schede descrittive per i test eseguiti. Tale analisi bibliografica è stata propedeutica alla realizzazione dei provini di muratura a scala reale realizzati presso il Laboratorio di Fisica Tecnica Ambientale dell'Università Iuav di Venezia (FisTec).

## 7.2 Materiali costruttivi

Considerando il patrimonio storico-culturale presente nella Laguna di Venezia, si è ricreato in laboratorio un modello rappresentativo della tecnologia costruttiva lagunare, ossia una muratura realizzata con mattoni di laterizio e malta di calce. L'obiettivo è quello di identificare i parametri intrinseci ed estrinseci che caratterizzano la risalita capillare, specialmente nel territorio veneziano, fornendo delle tecnologie e metodi utili all'identificazione di un quadro conoscitivo di base, su cui poi eseguire ulteriori interventi.

Nel seguito sono descritte di seguito alcuni risultati ottenuti relativamente la caratterizzazione dei materiali da costruzione.

Le sperimentazioni su modelli in muratura eseguite presso il Laboratorio FisTec, sono state condotte con la collaborazione del gruppo di ricerca in Scienze Chimiche per la conservazione dei Beni Culturali (Dipartimento di Scienze Ambientali, Informatica e Statistica) dell'Università Ca' Foscari di Venezia.

La costruzione dei modelli in muratura è avvenuta in due momenti temporali diversi (da ditte specializzate nella realizzazione di murature faccia a vista):

- Giugno 2020 modelli 1 e 2 (mattone industriale e malta di calce premiscelata NHL 3.5);
- Giugno 2020 modelli da 3 a 6 (mattone industriale e malta di calce premiscelata NHL 5);

- Gennaio 2022 modelli 7 e 8 (mattone nuovo da restauro e malta di calce tradizionale);
- Gennaio 2022 modelli 9 e 10 (mattone di recupero e malta di calce tradizionale);
- Marzo 2022 intonacatura modelli n. 2 (intonaco di calce e sabbia), n. 3 (intonaco di cocciopesto), n. 5 (intonaco di marmorino).

Nella Tabella 31 si riporta la descrizione dei materiali utilizzati nella costruzione.

Tabella 31. Specifiche tecniche dei materiali da costruzione.

Nome materiale	Specifiche
Mattone industriale	Mattone nuovo industriale, utilizzato per il restauro, mono-impasto di colore rosso, UNI 12x25x5.5
Mattone di recupero	Mattone di recupero periodo Ottocentesco
Malta di calce premiscelata NHL 3.5	Malta di calce idraulica naturale classe M5, spessore dei giunti pari a ~1 cm
Malta di calce premiscelata NHL 5	Malta di calce idraulica naturale classe M5, CL90S, spessore dei giunti pari a ~1 cm
Malta di calce tradizionale	Malta di calce aerea naturale (grassello di calce 24 mesi + sabbia silicea Ø 0.1-4 mm, rapporto 3:1); spessore dei giunti della malta pari a ~1 cm, spessore dell'intonaco ~2 cm (2 strati)
Intonaco di calce tradizionale	Intonaco di calce aerea naturale (grassello di calce 24 mesi + sabbia silicea Ø 0.1-4 mm, rapporto 3:1); spessore dei giunti della malta pari a ~1 cm, spessore dell'intonaco ~2 cm (2 strati)
Intonaco di cocciopesto	Malta di cocciopesto (grassello di calce 24 mesi + sabbia silicea Ø 0.1-4 mm + laterizio Ø 0.6 mm, rapporto 3:1), spessore dell'intonaco ~2 mm (2 strati)
Intonaco di marmorino	Malta di marmorino (grassello di calce 24 mesi + sabbia silicea Ø 0.1-4 mm + marmo botticino Ø 1-3 mm, rapporto 3:1), spessore dell'intonaco ~2 mm (2 strati)

La scelta dei materiali costruttivi deriva da uno studio approfondito delle tecnologie costruttive veneziane e dei loro componenti di base. Il mattone industriale, di nuova produzione, è un mattone molto utilizzato nel settore del restauro, in quanto le sue caratteristiche tecniche sono notevolmente simili a quelle riscontrate nei mattoni degli edifici storici della città. Le malte di calce premiscelata sono le più diffuse in commercio come malte di allettamento "da restauro"; per cui la combinazione di queste con il mattone industriale, ha potuto rispecchiare una situazione molto simile ad un restauro nella città di Venezia. Si è deciso inoltre di utilizzare altri due materiali tipici e storicamente riscontrati nelle fabbriche dell'isola, come il mattone di recupero e la malta di calce aerea tradizionale. Infine, alcuni modelli in muratura sono stati intonacati per rispecchiare un altro tipo di tecnologia presente: in questo caso gli intonaci scelti sono quelli storicamente adottati a Venezia.

### 7.3 Costruzione modelli di muratura

I modelli in muratura hanno dimensioni 120/115 x 100/105 x 25 cm (a due teste, altezza totale 18/19 corsi) e sono state posizionate in n. 6 vasche di vetroresina (dimensione 120 x 80 x 19 cm)

e n. 4 vasche di plastica (dimensione 120 x 64 x 15 cm), sopra uno strato di malta di calce di spessore ~1.5 cm.

I modelli realizzati a Giugno 2020 sono stati mantenuti così com'erano per circa 60 giorni fino a completa stabilizzazione, e successivamente imbibiti con acqua dolce (conducibilità elettrica 3.86  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ). Per simulare il contatto con l'acqua dei canali veneziani o del terreno, il livello dell'acqua all'interno delle vasche è mantenuto costantemente a ~13 cm (corrispondente all'altezza di due corsi di mattoni), per un volume totale di circa 0.08 m<sup>3</sup>.

I modelli realizzati a Gennaio 2022 sono stati mantenuti in fase di stabilizzazione per circa 100 giorni in ambiente controllato (affinché la malta di calce naturale iniziasse il processo di carbonatazione,  $T = 21 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\text{RH} = 43 \pm 5 \%$ ), e successivamente imbibiti con acqua dolce.

Tabella 32. Tipologie modelli di muratura analizzati in laboratorio.

Modello	Materiali costruttivi
M1, M2	Mattone industriale + malta di calce premiscelata NHL 3.5
M2-CS	Mattone industriale + malta di calce premiscelata NHL 3.5 + intonaco di calce tradizionale
M3, M4, M5, M6	Mattone industriale + malta di calce premiscelata NHL 5
M3-C	Mattone industriale + malta di calce premiscelata NHL 5 + intonaco di cocciopesto
M5-M	Mattone industriale + malta di calce premiscelata NHL 5 + intonaco di marmorino
M7, M8	Mattone industriale + malta di calce tradizionale
M9, M10	Mattone di recupero + malta di calce tradizionale

### 7.3.1 Trattamenti di “stimolazione” della risalita capillare

Nei primi 18 mesi di simulazione delle murature in laboratorio (realizzate con mattone industriale e malta di calce premiscelata) si è osservato un fenomeno di risalita capillare molto lento, nonostante le pareti siano rimaste costantemente immerse in acqua ad un livello mantenuto costante per tutto il periodo di analisi.

Si è quindi valutato di “stimolare” la risalita capillare applicando dei fenomeni che possano simulare l'ambiente reale veneziano oggetto di analisi, ossia:

- a) M1 - simulazione dell'ambiente marino con salinità dell'acqua pari al 5% (superiore alla concentrazione salina media del mar Adriatico, pari al 3.8% [2]), aggiungendo in una vasca d'acqua NaCl;
- b) M2 - impermeabilizzazione laterale di una parete con film in PE per limitare l'evaporazione laterale della muratura;
- c) M3 - bagnatura di una parete dall'alto per simulare gli agenti atmosferici (pioggia) esterni, con ripetizione oraria per i primi 3 giorni, poi con cadenza settimanale;
- d) M4 - variazione delle condizioni microclimatiche attorno ad una parete con aumento dell'umidità relativa ( $96 \pm 4\%$ ) e mantenimento costante della temperatura ( $21 \pm 3^\circ\text{C}$ ), sigillando parete + vasca d'acqua con film in PE in un unico ambiente a condizioni.

Tabella 33. Azioni e trattamenti vari eseguiti sui modelli di muratura in laboratorio per la valutazione del fenomeno di risalita capillare.

Periodo	Tempo di inizio [mese]	Trattamento/Azione	Modello	Durata prova [mesi]
Settembre 2020	0	Imbibizione	M1-6	21
Febbraio 2022	17	Imbibizione in acqua salata	M1	4
Febbraio 2022	17	Impermeabilizzazione laterale	M2	1
Febbraio 2022	17	Simulazione pioggia	M3	1
Febbraio 2022	17	Variazione microclima	M4	4
Marzo 2022	18	Applicazione intonaci	M2, M3, M5	3
Maggio 2022	0	Imbibizione	M2, M3, M5, M7-10	1



Figura 42. Fase di costruzione delle pareti in muratura: Giugno 2020 (sinistra) e Gennaio 2022 (sinistra).

Tali sperimentazioni (Figura 43), attuate a Febbraio 2022, hanno previsto il mantenimento di n. 2 murature come “elementi di controllo” e verificare eventuali variazioni nel tempo. I trattamenti (b) e (c) si sono conclusi dopo circa 40 giorni di sperimentazione, il trattamento (d) ha avuto la durata di un anno e infine il trattamento (a) – in quanto non reversibile – è ancora in fase di prosecuzione.

In generale, i trattamenti hanno portato delle leggere variazioni in tutti i casi analizzati, per poi ritornare alla situazione pretrattamento una volta terminato il processo. I risultati sono riportati in § 7.4.2.5.3.



Figura 43. Trattamenti sperimentali murature in laboratorio.

### 7.3.2 Rivestimento con intonaco

A marzo 2022 le pareti in muratura M2, M3 e M5, sono state intonacate su due facce della parete (lato lungo) per verificare l'influenza dello stesso sulla risalita capillare, ed eventuali variazioni del contenuto d'acqua al suo interno. Gli intonaci scelti sono le tre tipologie più diffuse in ambito veneziano, applicati mediante un primo strato steso con frattazzo<sup>27</sup> (su superficie bagnata) ed infine lisciatura a ferro:

- Intonaco di calce e sabbia, spessore ~ 4 mm (2 strati), costituito da sabbia di cava (Ø 0.1-4 mm, provenienza Asolo-Monfumo) e grassello di calce, stagionatura 24 mesi (rapporto 3:1);
- Intonaco di cocchiopesto, monostrato spessore ~ 4 mm (2 strati stesi in spessore), costituito da sabbia (Ø 0.1-4 mm), grassello di calce, stagionatura 24 mesi (rapporto 3:1) e laterizio macinato (frammenti di mattone/coppi Ø 0.6 mm) – rapporto finale 1 grassello: 1 ½ sabbia: 1 ½ cocchiopesto;
- Intonaco di marmorino in tinta unita “opaco”, spessore ~ 4 mm (2 strati – primo strato “marmorino magro”, secondo strato “marmorino grasso”), costituito da sabbia (Ø 0.1-4 mm), grassello di calce, stagionatura 24 mesi (rapporto 3:1) e marmo botticino (cristalli romboedrici di dolomite con presenza di granuli calcarei, 2 parti di spolvero 1 mm + 1 parte di scaglia 3-5 mm).

<sup>27</sup> Frattazzo: strumento utilizzato per la stesura dell'intonaco, originariamente in legno, ora anche in altri materiali (acciaio, plastica, ...)

Per la realizzazione di tale lavorazione, la vasca d'acqua alla base della muratura è stata svuotata per garantire la corretta posa dell'intonaco fino al basamento (Figura 44). La fase di stagionatura dell'intonaco è durata circa 45-50 giorni ( $T = 21 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $RH = 44 \pm 5 \%$ ); in seguito, le vasche sono state nuovamente riempite con acqua dolce.

Come nei casi precedentemente descritti sono state fatte delle valutazioni mediante indagini non invasive; in questo caso si è potuto osservare delle maggiori variazioni nel tempo (§ 2.1.1).



Figura 44. Stesura intonaci sulle murature in laboratorio: da sinistra, intonaco di calce e sabbia, cocciopesto e marmorino.

## 7.4 Monitoraggio della risalita capillare

Osservazioni e monitoraggi eseguiti sulle murature per valutare il fenomeno di risalita capillare. Sono state utilizzate diverse tecniche di analisi degli effetti che la risalita capillare provoca su elementi di muratura, di seguito approfondite. Si tratta di metodi di tipo non invasivo, in continuo o discontinuo, a seconda della tecnologia utilizzata (Tabella 34).

Tabella 34. Monitoraggi eseguiti sui modelli di muratura in laboratorio.

Monitoraggio	Tecnica	Strumento	U.M.	Timestep
In continuo	Microclima (T-RH)	Data-logger	$^\circ\text{C}\text{-}\%$	15 min
	Differenza di potenziale	Data-logger	mV	1 ora
	Impedenza elettrica	Data-logger	$\Omega$	1 ora
Discontinuo	Rabbocco H <sub>2</sub> O	Bilancia	l	Settimanale
	Conducibilità elettrica H <sub>2</sub> O	Conduttivimetro	$\mu\text{s}/\text{cm}$	Settimanale
	Altezza risalita	Fotografia/termografia	cm	Mensile
	Temperatura superficiale	Termografia	$^\circ\text{C}$	Mensile
	Contenuto umidità superficiale	Termoigrometro capacitivo/resistivo	%WME digit	Mensile

## 7.4.1 Monitoraggio in continuo

### 7.4.1.1 Microclima

I dispositivi utilizzati per il monitoraggio microclimatico interno sono data logger che registrano in continuo (timestep 15 min) temperatura dell'aria T [°C] e umidità relativa RH [%][155],[156]. Nel grafico in Figura 45 vengono mostrati due microclima differenti, relativamente gli ambienti di analisi dei modelli in muratura: la serie "Sala M8" fa riferimento all'ambiente in cui è stato posizionato il modello M8 in seguito all'applicazione del sistema di trattamento "passivo" di tipologia (B).

Tabella 35. Specifiche data logger T-RH

Specifiche	Dati
Misurazione	T = -20°C + 70°C RH = 5-95%
Accuratezza	T = ± 0.35 (da 0°C a +50°C) RH = ± 2.5% (da 10% a 90%)
Risoluzione	T = 0.02°C a +25°C RH = 0.03%
Tempo di risposta	T = 6 min al 90% RH = 1 min al 90% tipico
Memoria	64 kB
Dimensioni	74 x 22 mm

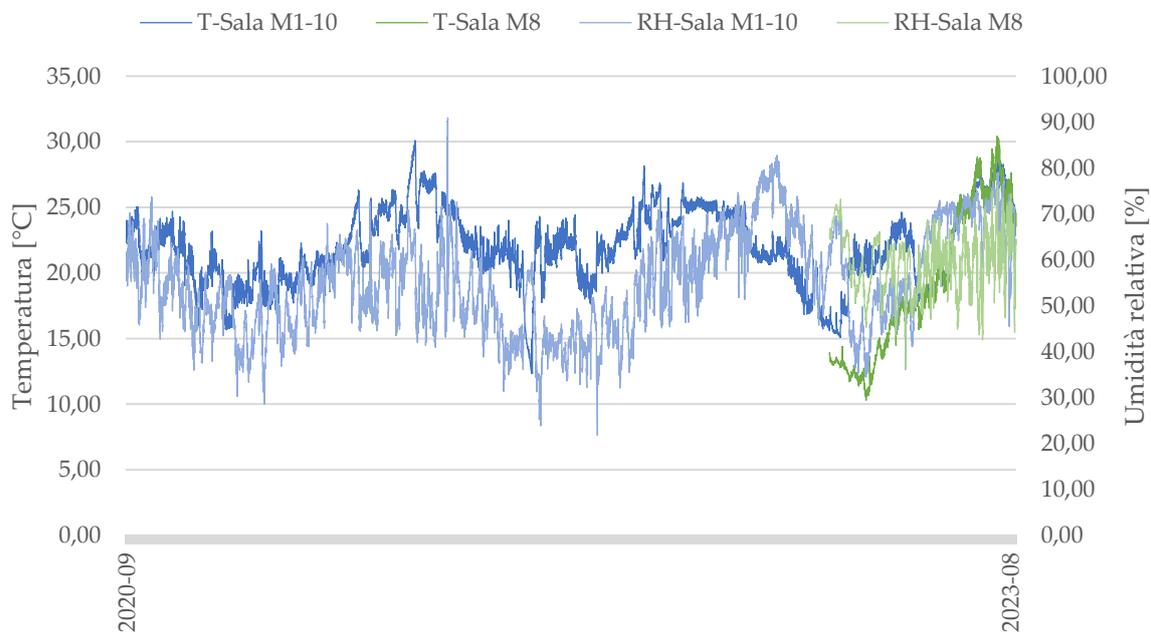


Figura 45. Microclima interno laboratorio FisTec Università Iuav di Venezia.

### 7.4.1.2 Impedenza elettrica e differenza di potenziale

Le molecole d'acqua alimentate da un campo elettromagnetico terrestre tendono a spostarsi naturalmente dal basso verso l'alto, causando una risalita dell'umidità all'interno dei pori nella

muratura, che ne determina un potenziale elettrico verticale fra la base muraria e il fronte di risalita (§ 1.2.2.2).

Per la valutazione istantanea della risalita si sfrutta un metodo di misura capacitivo (non influenzato dai Sali) con impianto di acquisizione costituito da elettrodi fissati all'interno della muratura mediante fori. L'emanazione di impulsi elettromagnetici permette di registrare la capacità elettrica nella muratura, e seguire in modo indiretto l'andamento complessivo dell'umidità (timestep orario), leggendo le differenze di potenziale elettrico basso-alto [mV], con misura in continuo, e l'impedenza tra due punti [OHM], con misure in alternata all'interno. Il voltaggio non fornisce alcuna indicazione sul contenuto d'acqua all'interno della struttura, ma indica solo la velocità di risalita in un determinato punto e momento temporale, collegata al fenomeno di evaporazione superficiale. Gli elettrodi a spazzola in acciaio inox (tipo M25, lunghezza fino a 100 mm, Ø 3 mm) per la ddp sono posizionati rispettivamente ad un'altezza di 20 e 80 cm; per l'impedenza elettrica gli elettrodi sono posizionati a coppie (interasse 6.5 cm) ad altezza di 20, 40 e 85 cm, come in Figura 46. L'acquisizione e memorizzazione dei dati avviene mediante collegamento a modem GPS.

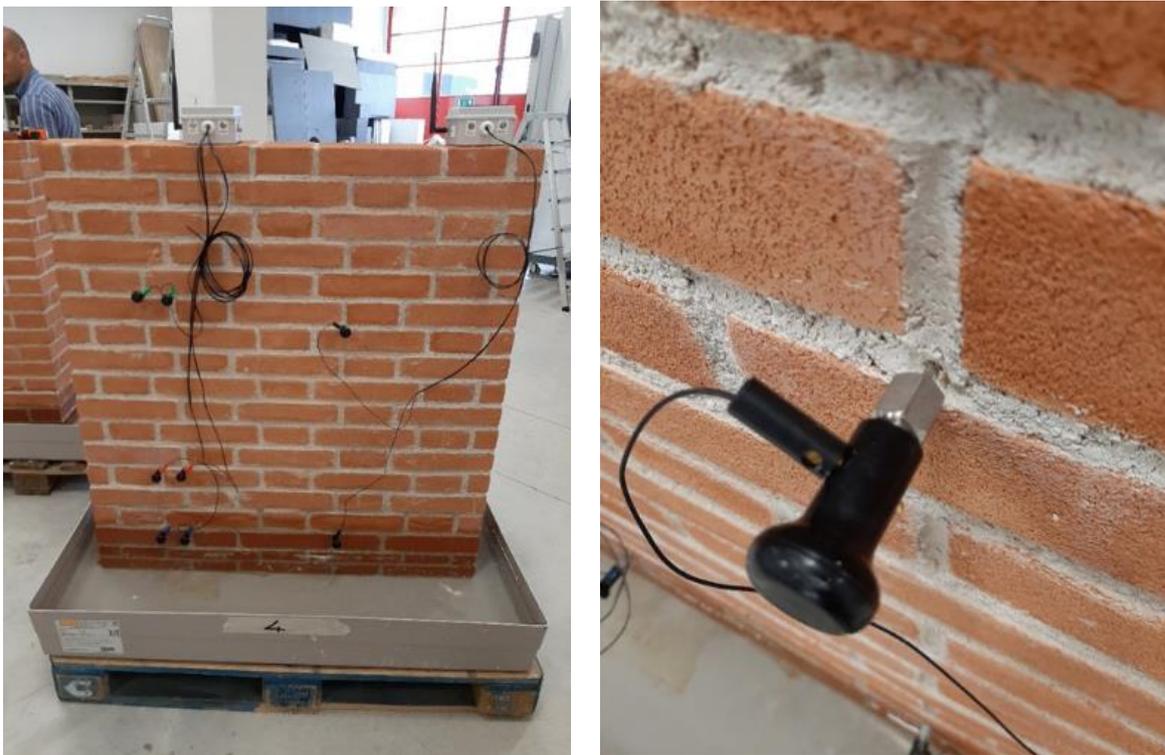


Figura 46. Sistema di monitoraggio capacitivo con particolare di elettrodo a chiodo. Nella foto a sinistra si vede il monitoraggio della differenza di potenziale a destra, e resistenza elettrica a tre differenti altezze a sinistra.

Tale sistema si basa sulla valutazione della costante dielettrica del materiale in funzione del contenuto di umidità (Tabella 36): all'aumentare dell'umidità (intensità di risalita), aumenta il valore della differenza di potenziale (o costante, nel caso di elettrodi accoppiati alla stessa altezza). Uno svantaggio del metodo è la possibilità di influenza dovuto alla presenza di cavità, discontinuità interne o pellicole d'acqua derivate dalla presenza di condensa.

Tabella 36. Differenza di potenziale nella muratura umida (Pinto Guerra) [24].

Differenza di potenziale [ $ mV $ ]	Tipologia di risalita
0	Non c'è risalita
20-30	Risalita fisiologica
110-130	Risalita debole ma significativa
200-300	Risalita media abbastanza forte
~ 500	Risalita massiccia

Questo metodo di monitoraggio può fornire un dato utile per la conoscenza dell'andamento generale della risalita capillare all'interno della struttura, ma non fornisce un dato quantitativo sul contenuto di acqua nella muratura stessa. È inoltre da tenere in considerazione che moltissime variabili correlate alla costruzione (ritmo evaporativo, spessore muratura, presenza di cavità o vuoti d'aria), possono influenzare la lettura dei dati, non assicurando un risultato corretto.

Nelle murature si riscontrano mediamente differenze di potenziale variabili tra 250 e 500 mV (intenso flusso di risalita). Nei mesi di febbraio e marzo 2022 si possono notare delle variazioni notevoli nella ddp in M3-4, in seguito all'applicazione dei trattamenti di stimolazione (§ 7.3.1), con un notevole aumento del flusso di risalita. Un'anomalia da non considerare si verifica quando gli elettrodi sono stati staccati da M3 e M5 per alcuni giorni per eseguire i lavori di intonacatura delle pareti (marzo 2022); in seguito, l'imbibizione sulle pareti intonacate (M3-C, M5-M) ha determinato un aumento del flusso, con risalita identificata come massiccia (Tabella 37). Si può notare inoltre come quattro modelli in muratura completamente uguali dal punto di vista materico e tecnologico (senza l'applicazione di alcun tipo di trattamento e senza intonaco), mostrino degli andamenti completamente diversi tra loro.

Tabella 37. Registrazione dati ddp tra le varie murature in laboratorio. Per l'identificazione della tipologia di risalita si fa riferimento al manuale di E. Pinto Guerra [24].

Muro	ddp media [ $ mV $ ]	Tipologia di risalita (valori assoluti)
M3	459 ± 156	Risalita da medio-forte (303 mV) a massiccia (615 mV)
M3-C	411 ± 218	Risalita da media (193 mV) a massiccia (629 mV)
M4	4 ± 92	Risalita debole
M5	494 ± 171	Risalita da medio-forte (323 mV) a massiccia (665 mV)
M5-M	557 ± 196	Risalita da forte (361 mV) a massiccia (753 mV)
M6	121 ± 185	Risalita da fisiologica (64 mV) a medio-forte (306 mV)
M7	114 ± 364	Risalita da medio-forte (249 mV) a massiccia (478 mV)

La misurazione della quantità di umidità nei materiali mediante impedenza elettrica dipende dalla conducibilità elettrica dell'acqua in cui sono disciolti dei Sali. Lo strumento sopra descritto fornisce risultati compresi tra 0 (conducibilità massima e quindi massima presenza di acqua nel materiale) e  $\infty$  (conducibilità minima, assenza di acqua nel materiale), come visibile in Tabella 38.

In Tabella 39 vengono riportati i valori di impedenza media registrati durante il periodo di analisi delle murature. La conversione delle misure di impedenza elettrica in contenuto [%] di

umidità superficiale sono riportati in Figura 48: nella parte inferiore della muratura (altezza 20 cm) si registra un contenuto di umidità superficiale più alto rispetto alla parte superiore (40 e 85 cm), con valori compresi tra il 12% e il 15% nel primo caso, e valori intorno al 9-10% nel secondo caso. La bagnatura superficiale del modello comporta quindi una penetrazione del contenuto di umidità anche all'interno della struttura.

In generale si può affermare che tali metodi (differenza di potenziale e impedenza elettrica) non forniscono una traduzione in valori assoluti della percentuale di umidità presente nelle murature, perché sussistono molte variabili che rendono difficile la stesura di tabelle standardizzate (materiali, tecnologie costruttive, spessore muratura).

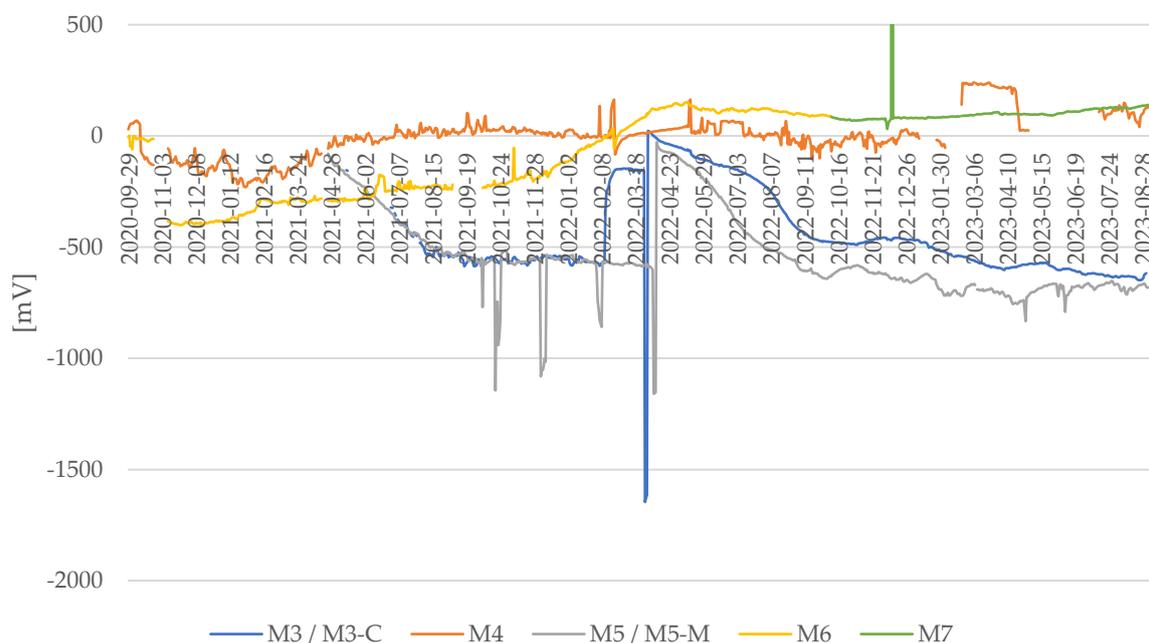


Figura 47. Ddp nelle quattro murature in cui è installato il sistema di misura resistivo.

Tabella 38. Tabella di conversione delle misure di resistenza in percentuale di umidità superficiale media (fonte BEFEC).

[ $\Omega$ ]	Umidità <sub>sup</sub> [%]	[ $\Omega$ ]	Umidità <sub>sup</sub> [%]	[ $\Omega$ ]	Umidità <sub>sup</sub> [%]
0	>16.26	10000	9.20	20000	5.75
1000	15.59	11000	8.74	25000	4.62
2000	14.68	12000	8.35	30000	3.56
3000	13.65	13000	7.99	35000	2.33
4000	12.80	14000	7.63	40000	1.49
5000	12.16	15000	7.31	45000	0.86
6000	11.42	16000	7.01	50000	0.45
7000	10.74	17000	6.67	60000	0.06
8000	10.15	18000	6.35	70000	0.01
9000	9.58	19000	6.10	>80000	0.00

Tabella 39. Registrazione dati impedenza elettrica tra due punti tra le varie murature in laboratorio.

Muro	Impedenza [ $\Omega$ ] (media)		
	20 cm	40 cm	85 cm
M3	3700 $\pm$ 515	9113 $\pm$ 1618	9456 $\pm$ 1060
M3-C	8331 $\pm$ 2011	9533 $\pm$ 598	9731 $\pm$ 261
M4	2030 $\pm$ 262	8801 $\pm$ 1799	9514 $\pm$ 438
M5	5487 $\pm$ 1614	9946 $\pm$ 272	10026 $\pm$ 90
M5-M	3071 $\pm$ 1228	6524 $\pm$ 1524	10035 $\pm$ 38
M6	2264 $\pm$ 466	9653 $\pm$ 184	9683 $\pm$ 224
M7	1268 $\pm$ 872	6285 $\pm$ 1780	9759 $\pm$ 6

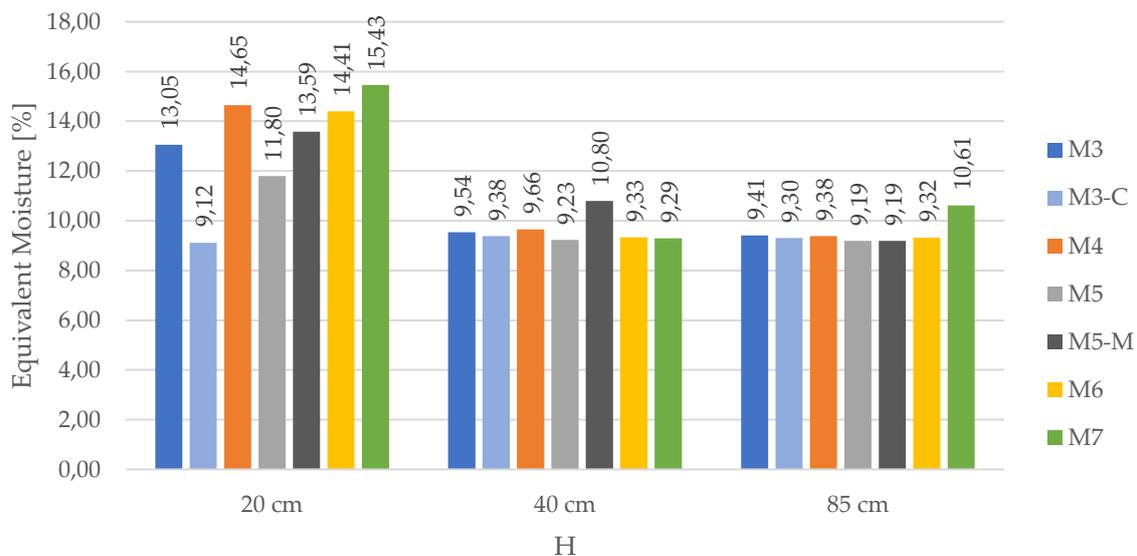


Figura 48. Contenuto di umidità superficiale [%] derivato dalla conversione dei valori di impedenza elettrica.

## 7.4.2 Monitoraggio discontinuo

### 7.4.2.1 Quantità e conducibilità elettrica H<sub>2</sub>O di imbibizione

Il rabbocco di acqua nelle vasche (con frequenza settimanale) ha registrato una tendenza in diminuzione dall'inizio della sperimentazione, su tutti i modelli indagati. Inoltre, la quantità di acqua di rabbocco è direttamente proporzionale alla temperatura dell'ambiente circostante: maggiore è la temperatura, maggiore sarà la quantità d'acqua necessaria a mantenere il livello costante nelle vasche, perché maggiormente soggetta ad evaporazione. Mediamente, quando  $T < 20^{\circ}\text{C}$  e  $\text{RH} \sim 50\%$ , il rabbocco è compreso tra i 15-18 l/mese; se  $T > 20^{\circ}\text{C}$  e  $\text{RH} > 55\%$ , il rabbocco è mediamente  $> 20$  l/mese. Il grafico in Figura 49 mostra le variazioni di rabbocco nei vari anni di sperimentazione, in relazione al microclima interno.

Contemporaneamente al rabbocco viene effettuato un controllo della conducibilità della stessa, mediante conduttivimetro portatile a tenuta stagna HANNA HI9033 fornito di sonda di conducibilità elettrica (Tabella 40). Dal riempimento delle vasche si è registrato un lieve e costante aumento della conducibilità nel primo anno di imbibizione nei modelli M1-6, legato al rilascio di Sali solubili da parte dei materiali da costruzione tra cui i solfati (solubili in H<sub>2</sub>O), per poi stabilizzarsi intorno a 5-6  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ; valori più bassi e invariabili ( $\sim 4$   $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) durante tutto

il periodo di analisi si sono riscontrati invece nei modelli M7-8, in quanto la mancanza di solfati nella composizione della malta ne determina una conducibilità inferiore. Nei modelli M9-M10 i mattoni di recupero hanno invece determinato un notevole incremento della conducibilità dell'acqua già dopo 1 giorno dal riempimento delle vasche; infatti, alcuni mattoni presentavano efflorescenze saline superficiali pre-costruzione, che hanno successivamente rilasciato in acqua. Altra variabile si è registrata con l'aggiunta di NaCl in acqua (5% del volume) per simulare l'acqua salata della laguna veneziana, che ha determinato un notevole aumento della conducibilità elettrica.

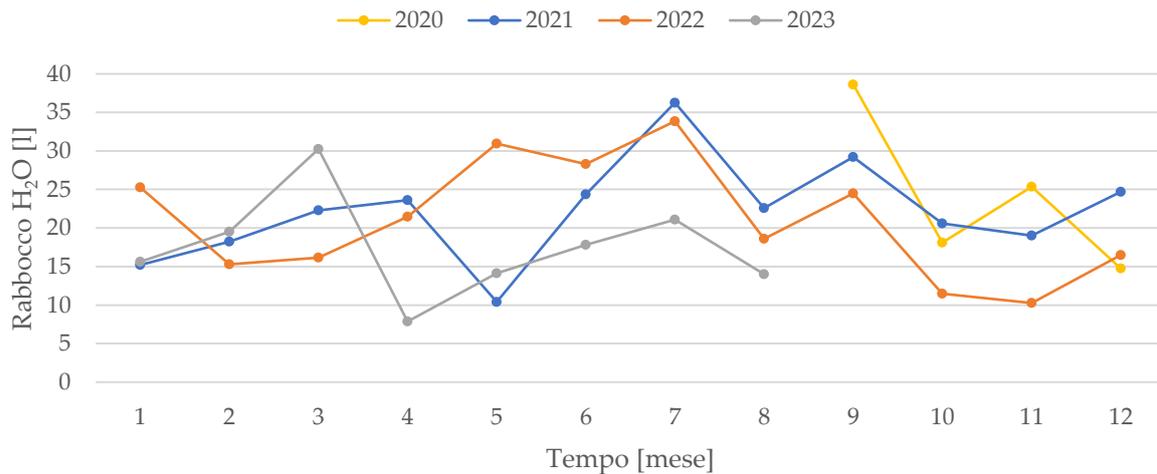


Figura 49. Valori medi mensili acqua di rabbocco dei modelli in muratura.

Tabella 40. Specifiche tecniche conduttivimetro HANNA HI9033.

Specifiche	Dati
Scala EC	0.0÷1999 $\mu$ S/cm; 0.00÷199.9 mS/cm
Risoluzione EC	0.1-1 $\mu$ S/cm; 0.01-0.1 mS/cm
Accuratezza EC	$\pm$ 1% FS (escluso errore della sonda)
Calibrazione EC	manuale a un punto
Compensazione della Temperatura EC/TDS	automatica
Sonda EC/TDS	HI76302W sonda di conducibilità con sensore di temperatura interno, connettore DIN e cavo da 1 m (3.3')
Tipo/ Durata Batteria	9V / ~100 h di uso continuo
Condizioni di Utilizzo	0÷50°C; RH max 95%

#### 7.4.2.2 Indagine visiva e fotografica

Uno dei primi metodi utilizzabili per diagnosticare e monitorare il fenomeno della risalita capillare nelle murature è l'indagine visiva, affiancata da quella fotografica. Con tali analisi è possibile osservare il fronte di risalita superficiale ed effettuare un confronto nel tempo, rilevando l'altezza di risalita in alcuni punti definiti, variazioni colorimetriche indicanti deposizione di materiali (incrostazioni saline, formazione biologiche) e/o fenomeni di erosione. In tutti i modelli analizzati, dopo una prima risalita molto rapida (max 2 mesi), il fronte umido si è stabilizzato nel tempo, con altezze differenti nelle varie murature a seconda

dei materiali costruttivi utilizzati. Nel grafico in Figura 50 è possibile osservare gli andamenti del fronte superficiale di risalita nel primo anno di analisi, con variazioni altimetriche a seconda dei materiali costruttivi utilizzati. I modelli in muratura realizzati con giunti di malta in calce-sabbia (M7-8 e M9-10) o rivestiti con intonaco di marmorino (M5-M) mostrano un fronte che tende comunque a subire maggiori fluttuazioni nel tempo.

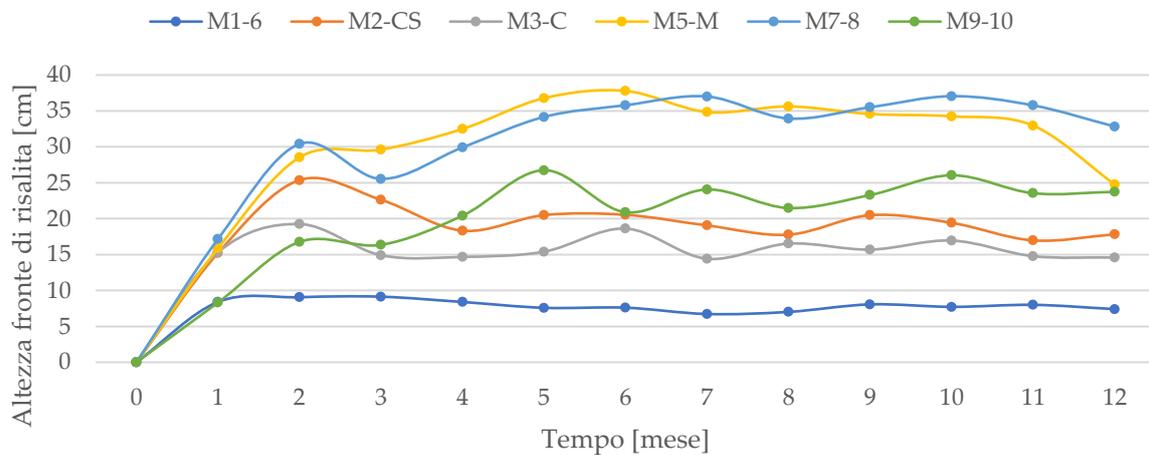


Figura 50. Andamento del fronte di risalita capillare nel primo anno di imbibizione dei modelli in muratura.

In generale, i modelli hanno manifestato variazioni di evaporazione significative in alcuni mesi di analisi, correlate alle variazioni termoigrometriche dell'ambiente, poiché constano di una grande superficie esposta; in una situazione reale l'evaporazione avviene solitamente su un solo lato della parete interessata.

#### 7.4.2.3 Termoigrometro: Protimeter



Figura 51. Termoigrometro Protimeter MMS2 e sonda ad aghi.

Il Protimeter è un termoigrometro che fornisce una valutazione del grado di umidità nelle murature sia superficiale che in profondità, mediante la misurazione di una resistenza elettrica al passaggio di corrente elettrica tra due elettrodi a contatto con la parete da investigare [155], [156](§ 2.2.2): poiché l'acqua liquida con impurità è un buon conduttore, maggiore è il contenuto di umidità nel materiale, minore sarà la resistenza opposta al passaggio della corrente e più elevata sarà la conducibilità elettrica. Non è un metodo analitico, infatti l'attendibilità del valore misurato può essere influenzata dalla presenza di Sali od elettroliti che possono far aumentare la conduttività elettrica, anche in presenza di modesti quantitativi di acqua, dalla temperatura superficiale e ambientale, dalla profondità di

infissione degli elettrodi e dalle irregolarità superficiali del materiale indagato, causando delle letture di falso-positivi.

Il modello utilizzato è il Protimeter MMS2 – Moisture Measurement System (condizioni di esercizio T 0-50°C e RH 0-95%), in grado di rilevare l'umidità in materiali solidi non conduttivi, come legno e muratura. Mediante sonda ad aghi (Heavy Dute Probe, profondità massima ago 10 mm) utilizzata nel caso in esame, è possibile rilevare superficialmente il reale contenuto di umidità MC% nel legno, oppure mediante letture equivalenti %WME (= Wood Moisture Equivalent) in materiali solidi non conduttivi come il tenore dell'acqua superficiale, posizionando gli aghi a diretto contatto con la superficie da investigare. WME esprime infatti la percentuale teorica del contenuto umido di un determinato materiale considerandolo come fosse un pezzo di legno. Lo strumento fornisce automaticamente dirette indicazioni sullo stato del materiale (Tabella 41): secco (dry), a rischio (risk, ossia un eccesso di umidità proveniente da una fonte definita) o bagnato (wet). Tale lettura non corrisponde al reale contenuto di umidità all'interno della muratura ma è utile per poter effettuare un confronto assoluto tra i dati rilevati e determinare o meno la presenza di acqua nel materiale nel tempo.

Tabella 41. Indicazioni contenuto di umidità superficiale %WME con Protimeter MMS2.

MC%WME	Indicazione	Progress bar
< 7.8	--	
≥ 7.8 < 17	Dry	
≥ 17 < 20	Wet	
≥ 20	Risk	

Da questi rilievi è possibile notare come nel caso del mattone, si registri un lento ma costante aumento del contenuto di umidità superficiale negli anni di sperimentazione. Si può osservare una proporzionalità indiretta dei dati correlata all'altezza di analisi: più il rilievo avviene ad un'altezza maggiore, più l'umidità superficiale diminuisce. Nei modelli realizzati con malta di calce premiscelata (M1-6, Figura 52), i valori di umidità maggiori si registrano nel III corso di mattoni (raggiungendo valori molto alti, fino a ~70 %WME), e nel IV corso di mattoni, con un leggero abbassamento del contenuto umido, con valori compresi tra 17 e 20 %WME nel primo anno e mezzo di analisi e poi si verifica un brusco aumento, con valori di umidità compresi tra il 40 e 50 %WME. Tale situazione si verifica in seguito alla rimozione del film impermeabile in PE applicato al modello M4 per stimolare la risalita dell'umidità con variazione del microclima al contorno (§ 7.3.1); questo sottolinea come l'aumento del contenuto di RH abbia influenzato il contenuto di umidità superficiale, che tende però a diminuire con il tempo una volta che le condizioni al contorno ritornano costanti. Nel V corso i valori si mantengono abbastanza stabili e sotto la soglia identificata come "a rischio"; solo negli ultimi mesi di sperimentazione si registra un aumento, correlato alla lenta ma costante suzione capillare interna.

Si osserva inoltre una certa variazione sui mattoni, correlata alle caratteristiche intrinseche degli stessi (porosità stessa, cavillature), ai Sali presenti in superficie e ai fenomeni evaporativi più o meno accentuati, direttamente dipendenti dalle condizioni microclimatiche al contorno

(T-RH). I modelli realizzati con malta di calce tradizionale (M7-10, Figura 53) e quelli intonacati (M2-CS, M3-C e M5-M, Figura 54), mostrano un contenuto di umidità superficiale più alto già nella prima fase di imbibizione, superando velocemente il IV e V corso di mattoni. In questo caso l'area umida si attesta fino al VII-VIII corso di mattoni. Tali valori sono sia collegati alla presenza della malta di calce tradizionale, caratterizzata da una maggior porosità, sia un maggior contenuto salino nella superficie dei mattoni di recupero. Infatti, nonostante la fase di lavaggio del mattone prima della realizzazione del modello, il materiale ha assorbito una elevata quantità di sale nel precedente uso, derivato probabilmente sia al diretto contenuto interno (fuoriuscito in fase di evaporazione), che dall'eccesso di acqua in fasi di costruzione o da precedenti esposizioni a risalita capillare.

#### 7.4.2.4 *Igrometro: Gann*

Il metodo prevede di registrare la capacità elettrica del materiale mediante termocoppie superficiali che generano impulsi elettromagnetici e danno un'indicazione del contenuto di umidità, senza l'influenza del contenuto salino ad eccezione del caso di deliquescenze. I misuratori si basano sulla valutazione della costante dielettrica di un materiale, in funzione del contenuto di umidità (§ 2.2.1): all'aumentare dell'umidità, aumenta la costante dielettrica relativa. Il metodo può essere influenzato dalla presenza di cavità, discontinuità interne, elementi metallici o pellicole d'acqua derivate da uno strato di condensazione superficiale che operano come schermi del campo elettromagnetico e Sali solubili.

Mediante lo strumento Gann Hydromette BL (igrometro capacitivo a contatto) si determina il contenuto di umidità superficiale nel materiale indagato, misurando l'alterazione del campo elettrico indotta dall'umidità presente nei primi 3-4 cm di massa muraria. La misura è espressa in digit, valore numerico con scala compresa tra 0 e 199.9; in Tabella 42 viene indicata la corrispondenza tra il valore in digit e il contenuto di umidità superficiale. Per la registrazione dei valori è stata utilizzata la porta elettrodi M20 e gli elettrodi M20-OF 15.

Tabella 42. Indicazioni contenuto di umidità superficiale in digit con Gann Hydromette BL.

<b>Ambiente</b>	<b>Asciutto</b>	<b>Umido</b>	<b>Bagnato</b>
Domestico	< 40	41 - 80	>81
Cantina	< 60	61 - 100	>101

Il grafico in Figura 55 mostra l'andamento dell'umidità superficiale sulle murature indagate (valori medi) relativamente il III corso di mattoni, ossia corrispondente al livello appena superiore al pelo libero dell'acqua. Tutti i modelli mostrano un andamento simile tra loro e coerente con le condizioni microclimatiche al contorno, con leggere variazioni a seconda dei materiali costruttivi utilizzati. A differenza del termoigrometro Protimeter (§ 7.4.2.3), si osservano in questo caso valori di umidità superficiale inferiori, ossia corrispondenti ad una parete leggermente umida e non completamente bagnata. Nei corsi di mattoni immediatamente superiori il trend di umidità è il medesimo, con livelli inferiori a mano a mano che aumenta l'altezza di analisi.

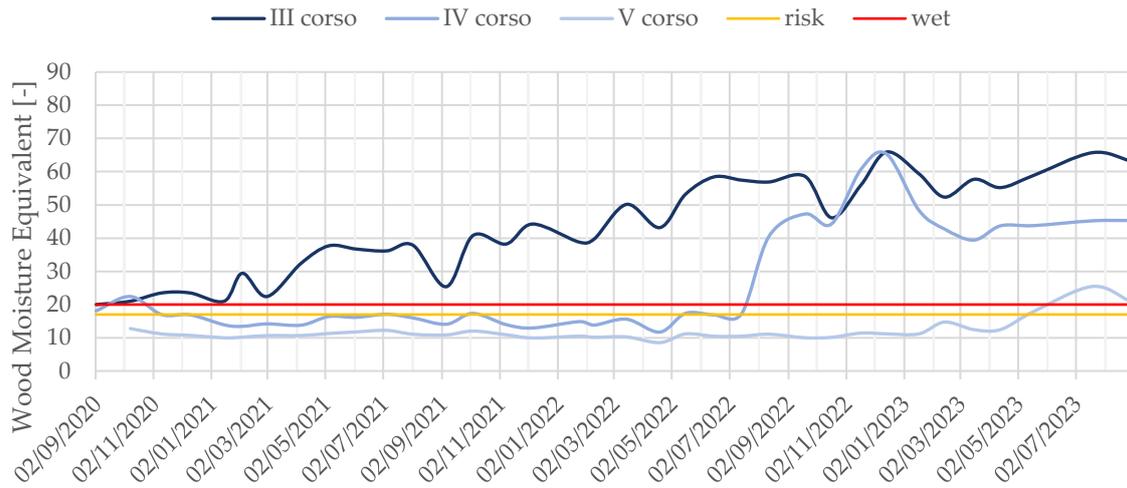


Figura 52. %WME medio tra i modelli di muratura M1-6, nei tre anni di costante imbibizione.

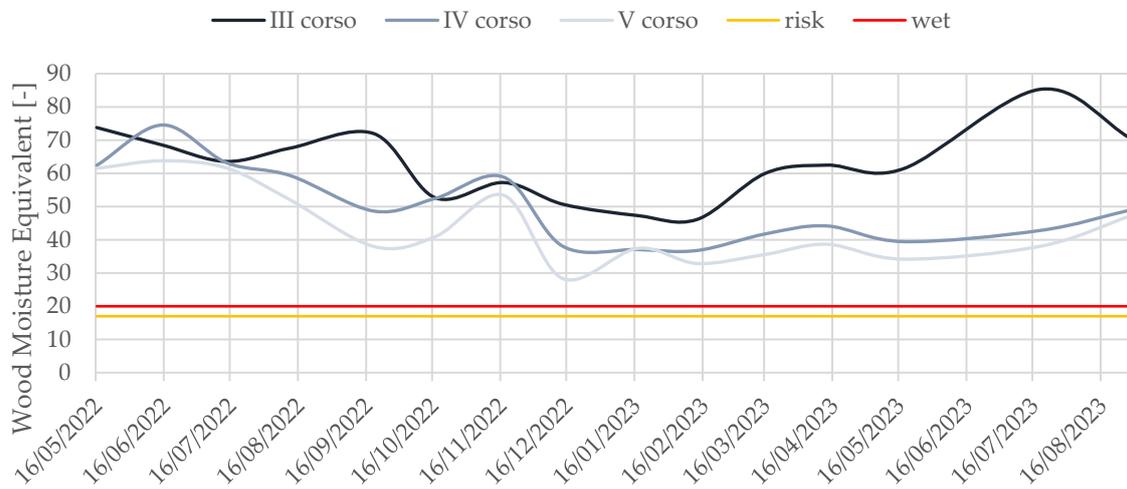


Figura 53. %WME medio tra i modelli di muratura M7-10, nel primo anno (circa) di costante imbibizione.

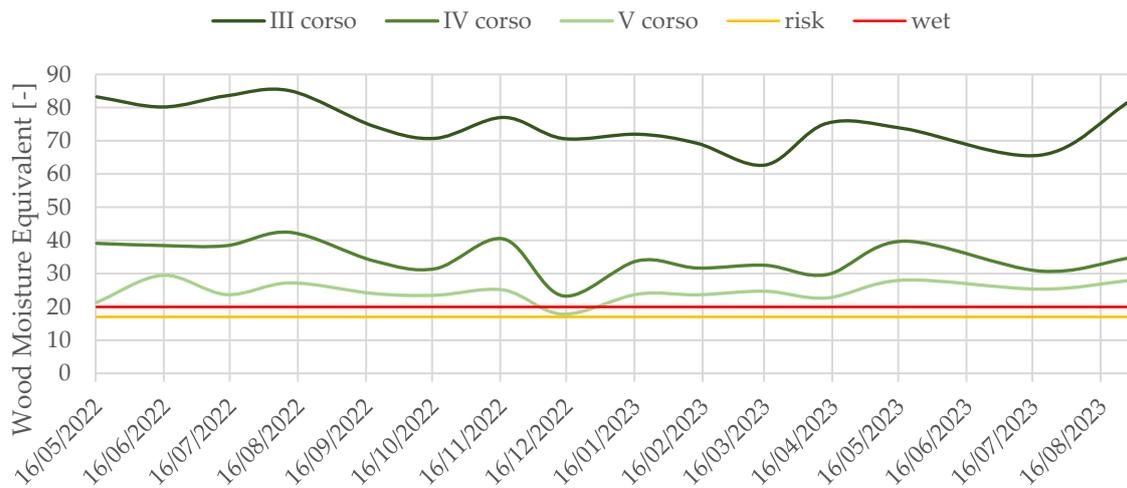


Figura 54. %WME medio tra i modelli di muratura intonacata, nel primo anno (circa) di costante imbibizione.

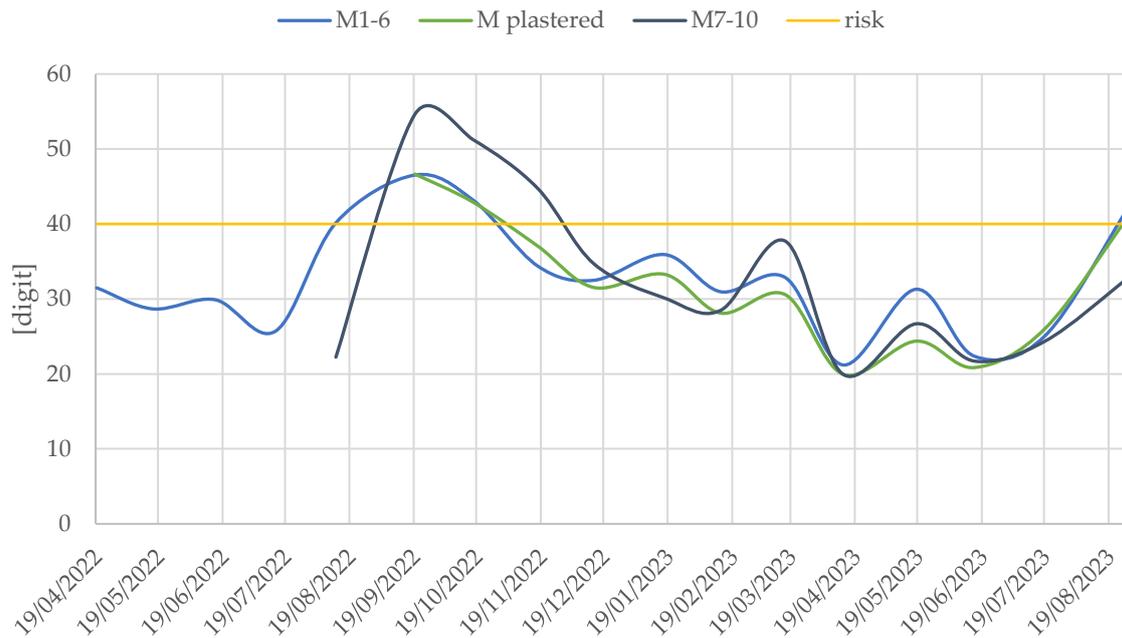


Figura 55. Valore medio di umidità superficiale tra i modelli di muratura, mediante igrometro resistivo Gann.

#### 7.4.2.5 Termografia ad infrarossi

Tale metodo di diagnosi (§ 2.2.5) permette di eseguire una valutazione è di tipo qualitativo, con mappatura cromatica comparativa delle superfici indagate e individuazione di eventuali profili termici anomali.

Nel caso in esame è stato assunto  $\varepsilon = 0.90$  per una muratura costituita da mattoni e malta con  $T = 20^{\circ}\text{C}$ , in quanto considerato come valore medio tra il mattone rosso ( $\varepsilon = 0.95$ ) e malta o intonaco ( $\varepsilon = 0.85$ ). La termocamera impiegata è una FLIR T1020, con obiettivo IR di 36 mm e FOV  $28^{\circ}$  (Tabella 43). La registrazione delle immagini è avvenuta per tutte le pareti di muratura alle stesse condizioni: distanza dall'oggetto osservato  $\sim 3$  m, e altezza dell'obiettivo  $\sim 0.90$  m.

Tabella 43. Specifiche tecniche termocamera FLIR T1020.

Specifiche	Dati
Display	4.3", 800 x 480 pixel
Risoluzione	1024 x 768 mm
Range temperatura di esercizio	-32 °C a +55 °C
Time lapse	15 sec fino a 24 h
Laser	Diodo laser semiconduttore AlGaInP, 1 mW, 635 nm
Sensore	Microbolometro Focal Plane Array (FPA)
Correzione emissività	0.01 - 1
Banda spettrale	7.5-14 $\mu\text{m}$
Campo visivo (FOV)	$12^{\circ} \times 9^{\circ}$
Distanza minima di allineamento IR visivo	1.3 m
Distanza minima di messa a fuoco IR	1.3 m

#### 7.4.2.5.1 Prima fase di imbibizione

Le riprese termografiche sono state effettuate ogni minuto nella prima ora di imbibizione e ogni 10 minuti nelle prime 24 ore. Dalle immagini in Tabella 44 è possibile notare come la risalita capillare dell'acqua, nelle murature M1-6, sia molto rapida nelle prime ore di imbibizione, con una netta marcatura orizzontale del fronte di risalita visibile anche ad occhio nudo. Le immagini termiche mostrano come alla base della muratura sia presente una zona di evaporazione a temperatura superficiale inferiore rispetto alla parte superiore ( $\Delta T$  medio  $\sim 2.5^\circ\text{C}$ ). Tale area arriva a raggiungere un'altezza media  $\sim 10$  cm (dal pelo libero) in 16 h, con una velocità media 0.34 cm/h nelle prime 24 h.

Tracciando un profilo verticale sulle immagini al centro della muratura per escludere l'influenza dell'evaporazione laterale, viene mostrata la risalita capillare durante il processo di imbibizione, correlata al tasso di evaporazione. Considerando le temperature rilevate su ogni singolo pixel nel modello ( $T$ ) e la temperatura superficiale del campione asciutto ( $T_d$ ), è possibile normalizzare i dati di temperatura superficiale ( $T_n$ , equazione (30)), come in Figura 56:

$$T_n [-] = \frac{T}{T_d} \quad (30)$$

Le immagini termografiche in Tabella 45 mostrano la risalita capillare dell'acqua nelle murature M7-8: come nel caso precedente, la risalita appare rapida e con un fronte di risalita ben delineato, con  $\Delta T \sim 4^\circ\text{C}$ . Si nota una maggior velocità di risalita (Figura 57), probabilmente correlata alla tipologia di malta utilizzata, infatti in 16 h il fronte di risalita raggiunge un'altezza media di  $\sim 13$  cm (dal pelo libero), con una velocità media di 0.71 cm/h nelle prime 24 h.

Nei modelli M9-10 (Tabella 46) si nota una risalita capillare molto simile a quella mostrata in Tabella 45, con una velocità intorno ai 0.29 cm/h in 24 h ed un'altezza media dal pelo libero di  $\sim 8$  cm nelle prime 16 h ( $\Delta T \sim 3^\circ\text{C}$ ). Con una semplice analisi visiva il fronte di risalita non appare molto nitido; l'analisi termografica rivela un fronte molto frastagliato ed irregolare (Figura 58) perché correlato alla presenza di mattoni di recupero, che possono presentare differenze porosimetriche tra loro e quindi diversa capacità e velocità di assorbimento d'acqua. Anche per le murature intonacate (M2-CS, M3-C, M5-M) è stata valutata la velocità di risalita capillare d'acqua, in Tabella 47 e Figura 59. Le immagini termografiche mostrano un fronte di risalita simile tra le tre pareti in 12 ore; variano velocità e l'altezza di risalita:

- In M2-CS la zona umida appare già visibile dopo 1 ora di imbibizione ( $\Delta T \sim 3^\circ\text{C}$ ), per poi salire lievemente fino a raggiungere un'altezza media dal pelo libero di  $\sim 13$  cm;
- In M3-C si forma una zona leggermente umida dopo circa 3 ore di imbibizione, per arrivare a mostrare un fronte netto dopo circa 6 ore ( $\Delta T \sim 2.5^\circ\text{C}$ ), con un'altezza media dal pelo libero di  $\sim 15$  cm;
- M5-M appare come un caso intermedio, con un limitato fronte di risalita già visibile dopo 1 ora di imbibizione (maggiore verso il lato corto del muro,  $\Delta T \sim 3^\circ\text{C}$ ), per poi salire leggermente fino ad arrivare a  $\sim 16$  cm dal pelo libero.

Dopo 24 di imbibizione costante, il profilo di risalita verticale viene confrontato tra i diversi mock-up, per valutare quali siano le differenze correlate alla tecnologia costruttiva. Nel grafico in Figura 60 vengono analizzate le temperature superficiali per ogni modello, successivamente normalizzate per valutare al meglio le differenze riscontrabili (Figura 61).

Le variazioni tra l'area umida e quella asciutta dipendono dalle caratteristiche igroscopiche dei materiali da costruzione utilizzati.

Tali curve hanno il medesimo andamento dei grafici ottenuti da Tavukçuoğlu and Grinzato [157], nella determinazione del contenuto critico di umidità nei materiali porosi. In quel caso la sperimentazione ha previsto di eseguire una serie di prove per rilevare una correlazione tra contenuto umido e temperatura superficiale rilevata mediante termocamera, utilizzando i medesimi mattoni industriali qui impiegati per la realizzazione dei modelli M1-8. I test hanno permesso di quantificare il tasso di evaporazione ( $R_E$ ) in funzione del contenuto umido e l'indice di evaporazione termica ( $ETI$ ) in funzione della temperatura superficiale (Figura 62).

La prospettiva futura sarà quindi quella di automatizzare il processo di elaborazione delle immagini termiche (qualitative) in dati quantitativi, correlando le temperature superficiali in contenuto umido superficiale, partendo dal singolo materiale poroso interessato ed arrivando all'analisi della struttura complessa (es. muratura).

Tabella 44. Prima fase di imbibizione di una parete in muratura in mattoni industriali e malta di calce premiscelata (M1-6).

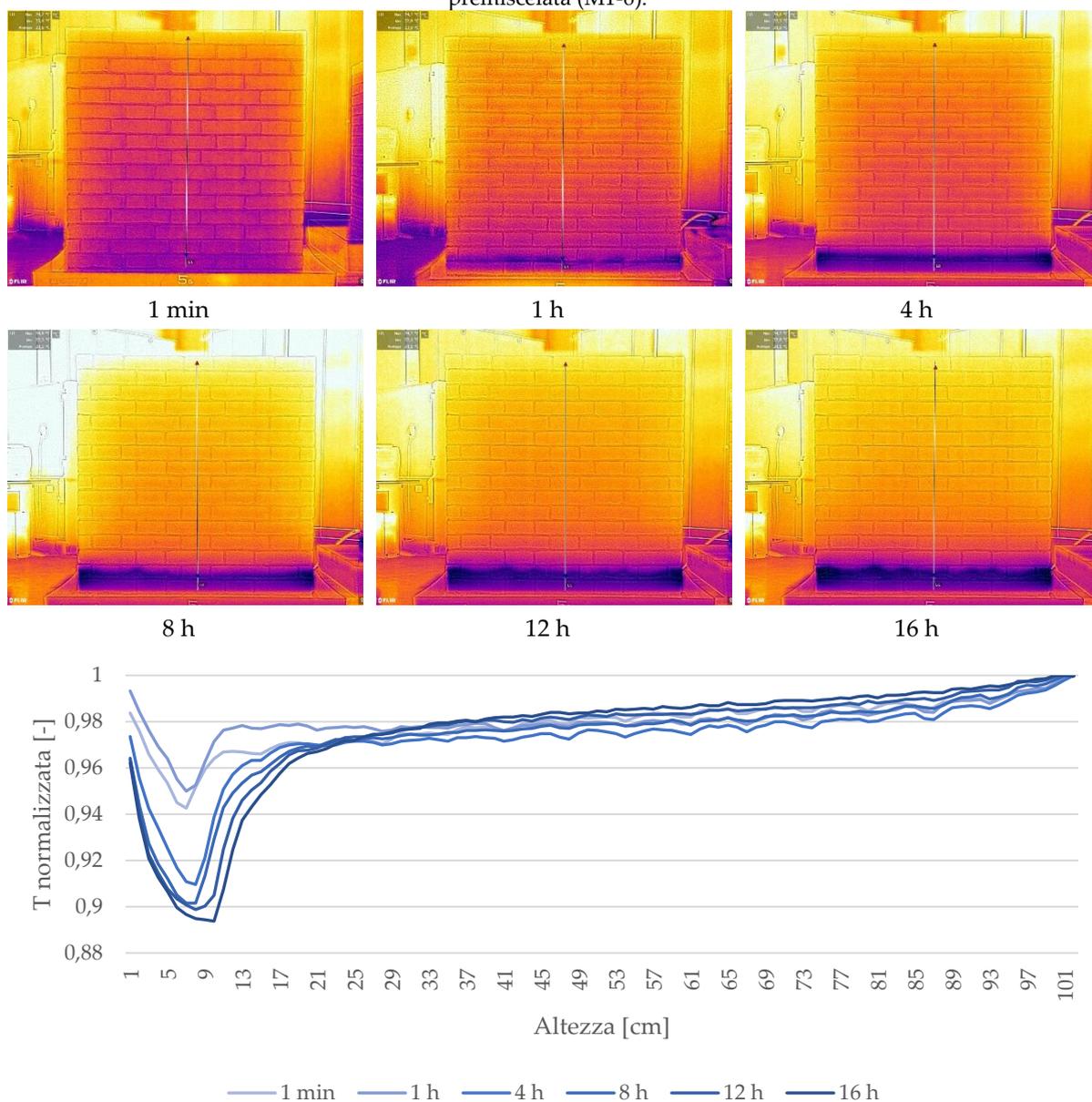


Figura 56. Temperature superficiali normalizzate, mock-up M1-6 nelle prime 16 ore di imbibizione.

Tabella 45. Prima fase di imbibizione di una parete in muratura in mattoni industriali e malta di calce tradizionale (M7-8).

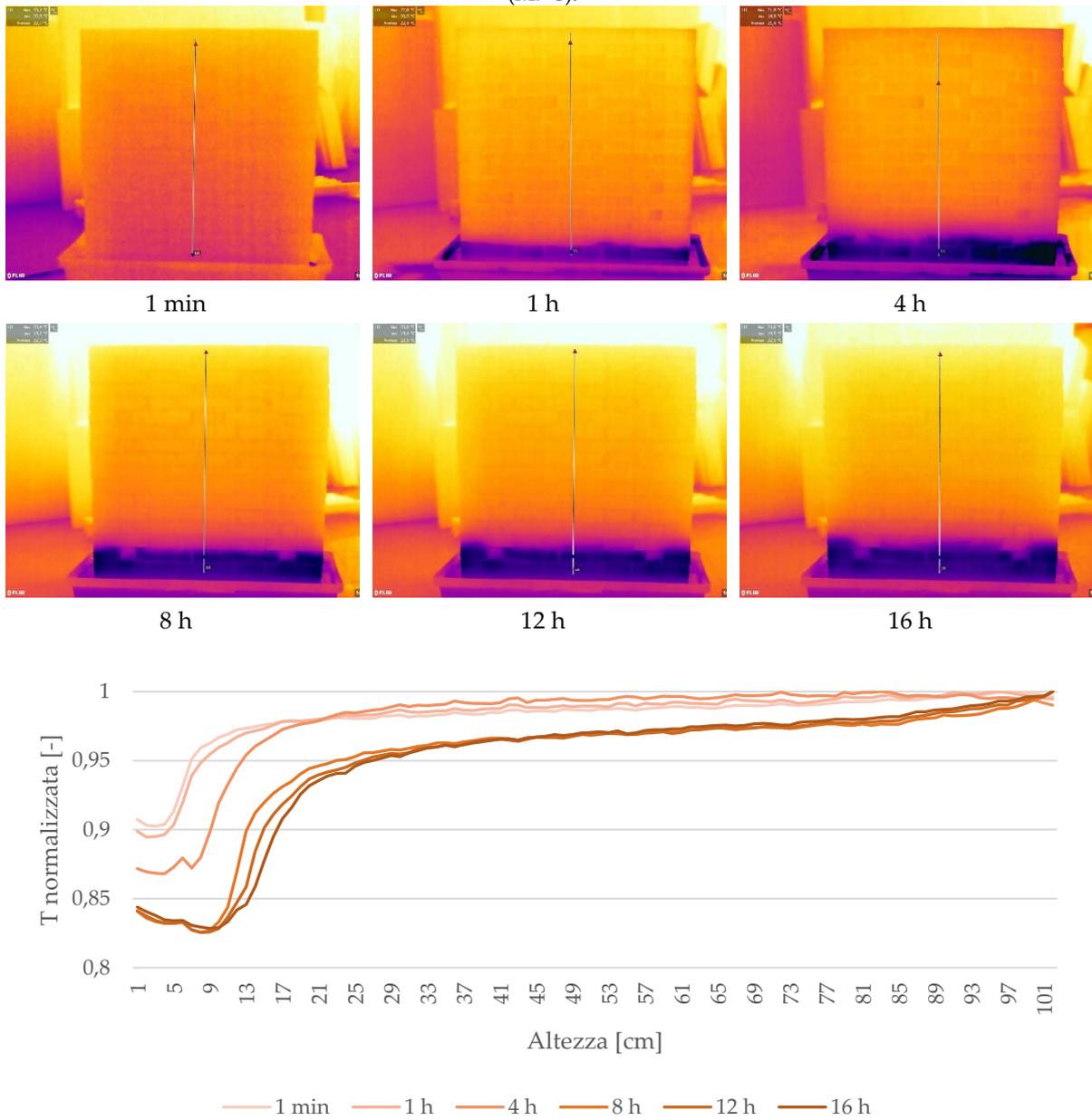


Figura 57. Temperature superficiali normalizzate, mock-up M7-8 nelle prime 16 ore di imbibizione.

Tabella 46. Prima fase di imbibizione di una parete in muratura in mattoni di recupero e malta di calce tradizionale (tipologia M9-10).

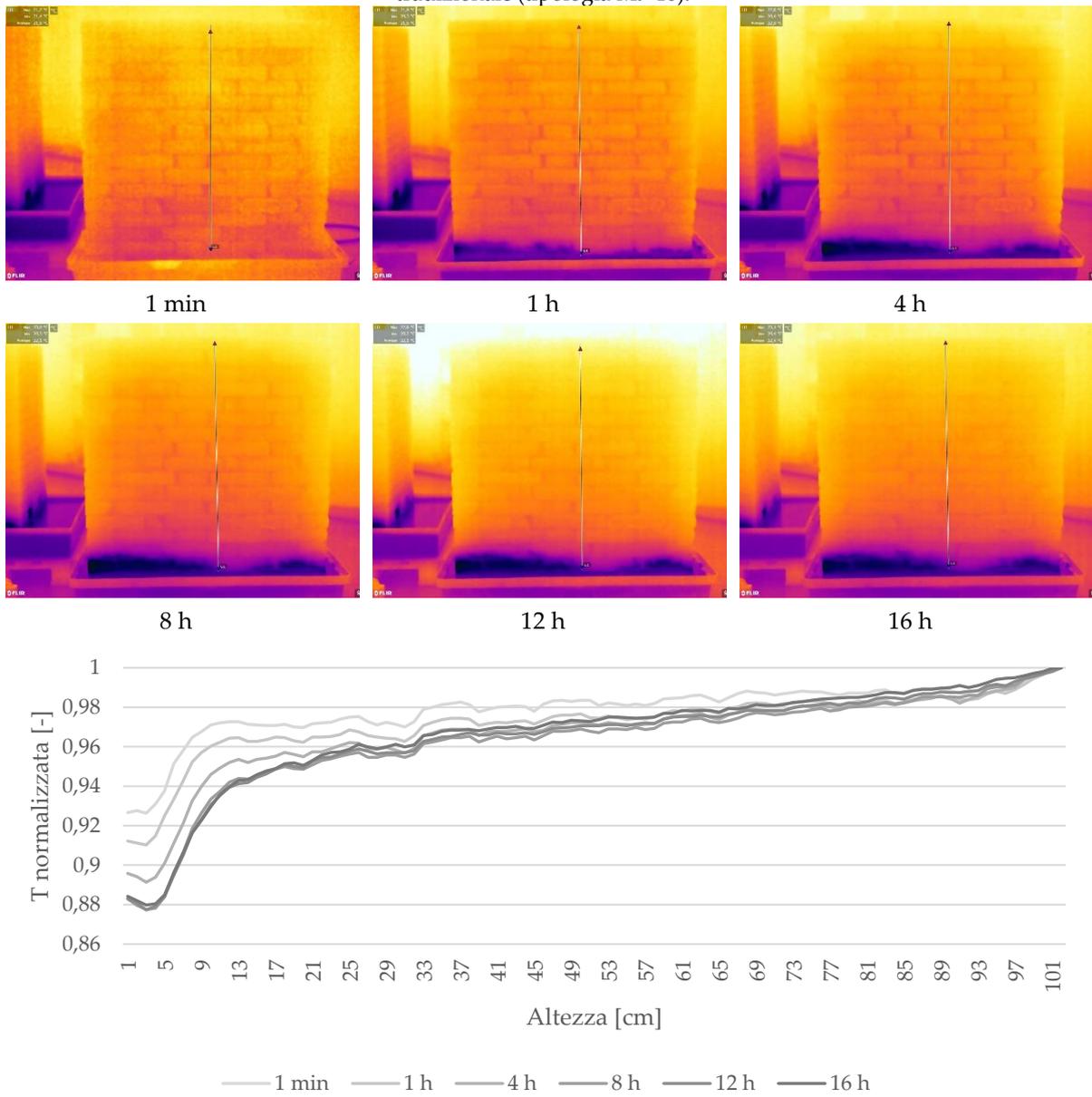


Figura 58. Temperature superficiali normalizzate, mock-up M9-10 nelle prime 16 ore di imbibizione.

Tabella 47. Prima fase di imbibizione di pareti in muratura in mattoni industriali e malta di calce premiscelata, intonaco di calce-sabbia (M2-CS), cocciopesto (M3-C) e marmorino (M5-M).

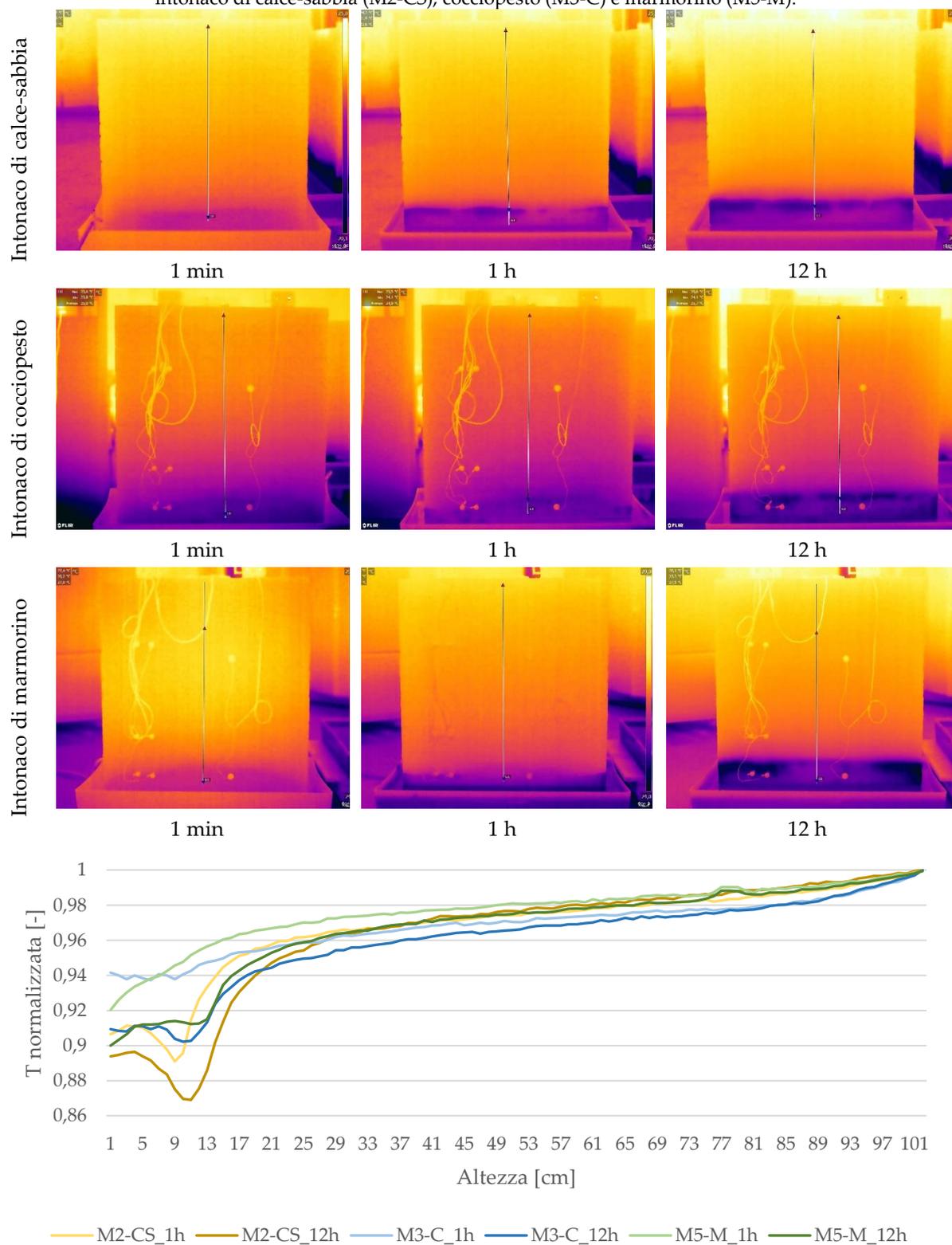


Figura 59. Temperature superficiali normalizzate, mock-up intonacati nelle prime 12 ore di imbibizione.

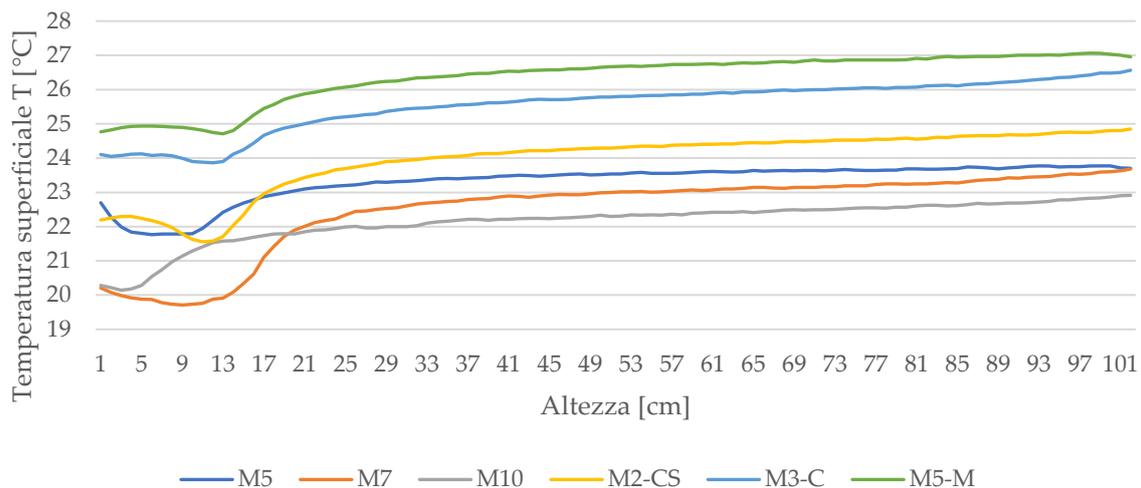


Figura 60. Temperatura superficiale nei vari modelli di muratura, dopo 24h di imbibizione.

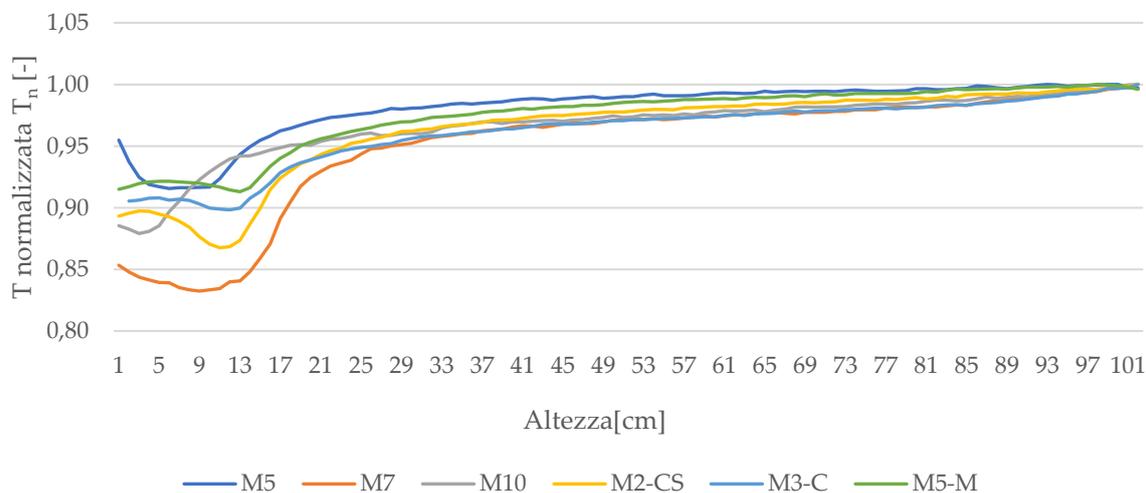


Figura 61. Temperatura superficiale normalizzata in vari modelli di muratura, dopo 24h di imbibizione.

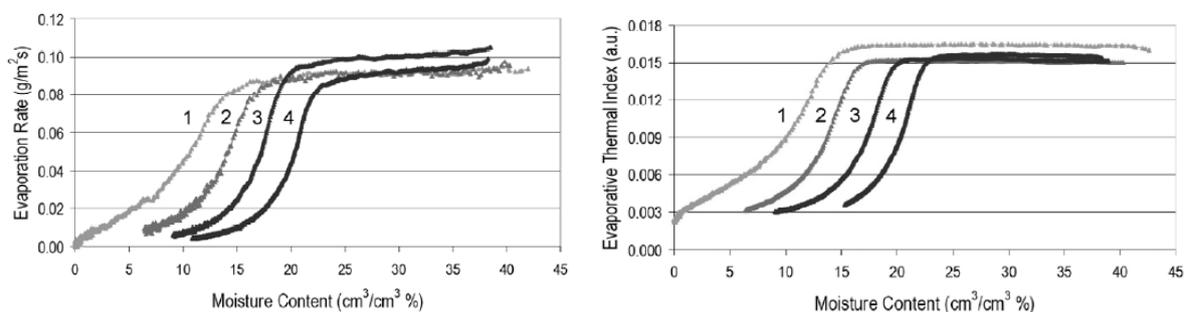


Figura 62. Curve RE (a sinistra) e ETI (a destra), correlate al contenuto umido del mattone industriale, nei vari spessori considerati (Tavukcuoğlu and Grinzato, 2006)

#### 7.4.2.5.2 Imbibizione costante nel tempo

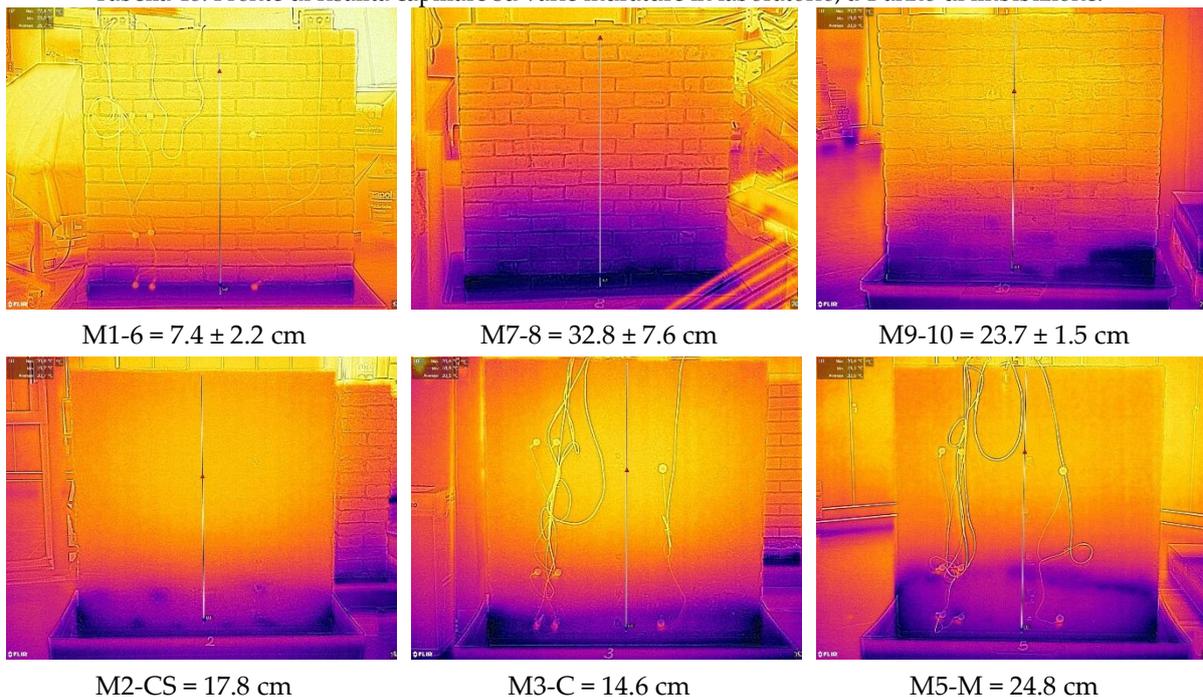
In seguito alla rapida imbibizione nel primo mese, per il tempo totale della sperimentazione le riprese termografiche sono state effettuate mensilmente. Il livello di risalita capillare si mantiene costante raggiungendo un fronte di altezza variabile a seconda dei casi considerati (Tabella 48). La risalita sembra quindi essere notevolmente influenzata dal tipo di malta utilizzata, che ne facilita (malta tradizionale) o meno (malta premiscelata) la suzione capillare, in base alla sua struttura porosimetrica.

Tracciando un profilo verticale sulle immagini, è possibile osservare la posizione in cui avviene la transizione tra zona umida e zona asciutta, passando da temperature più basse a temperature più alte. Il grafico in Figura 64 vuole rappresentare il trend delle temperature superficiali normalizzate nel primo mese di imbibizione in tutti i modelli studiati, utile ad individuare la corretta altezza del fronte di risalita.

I modelli realizzati con mattoni di recupero (M9-10) hanno un fronte di risalita molto più frastagliato e meno nitido rispetto alle murature con mattoni industriali (M1-8), nonostante sia visibile anche in questo caso la differenza di temperatura tra zona umida e asciutta.

Nelle murature intonacate (M2-CS, M3-C, M5-M) il fronte di risalita ha raggiunto un livello maggiore rispetto alle murature faccia a vista; nonostante le condizioni al contorno siano le medesime, si nota in questo caso come la variabile influente è l'intonaco applicato a rivestimento. Questi intonaci a base di calce aerea e senza additivi idrorepellenti fungono da ponte di suzione per l'acqua, come si osserva dal fronte concavo osservabile sul lato trasversale del modello in muratura (Figura 63), visibile principalmente nel primo mese di imbibizione. Nel lungo periodo, il sistema supera il livello precedentemente raggiunto nella muratura nuda, e allineando il fronte di risalita anche lateralmente, passando da un fronte concavo a orizzontale.

Tabella 48. Fronte di risalita capillare su varie murature in laboratorio, a 1 anno di imbibizione.



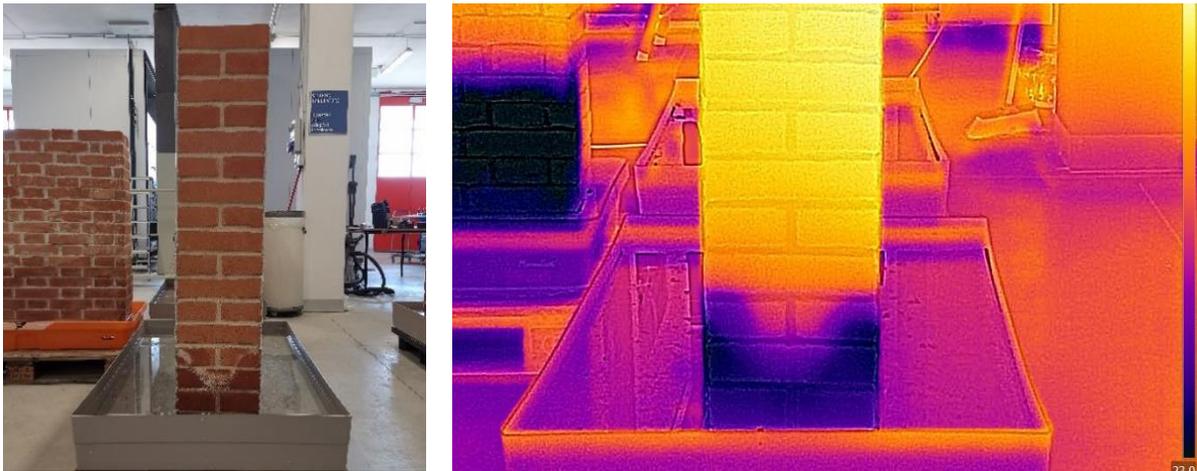


Figura 63. Immagine visibile e termografia IR del lato trasversale di M2-CS, intonacato con calce-sabbia.

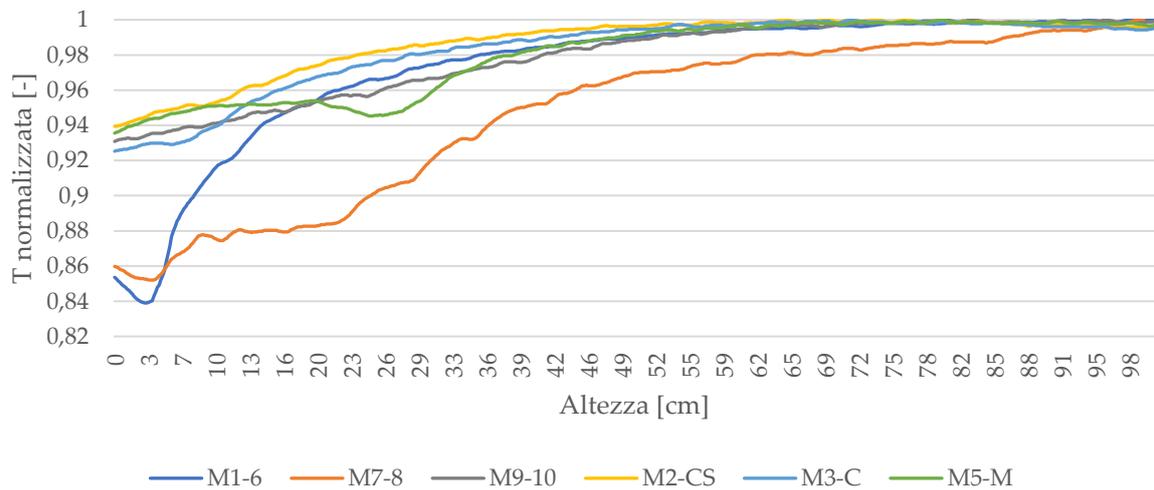
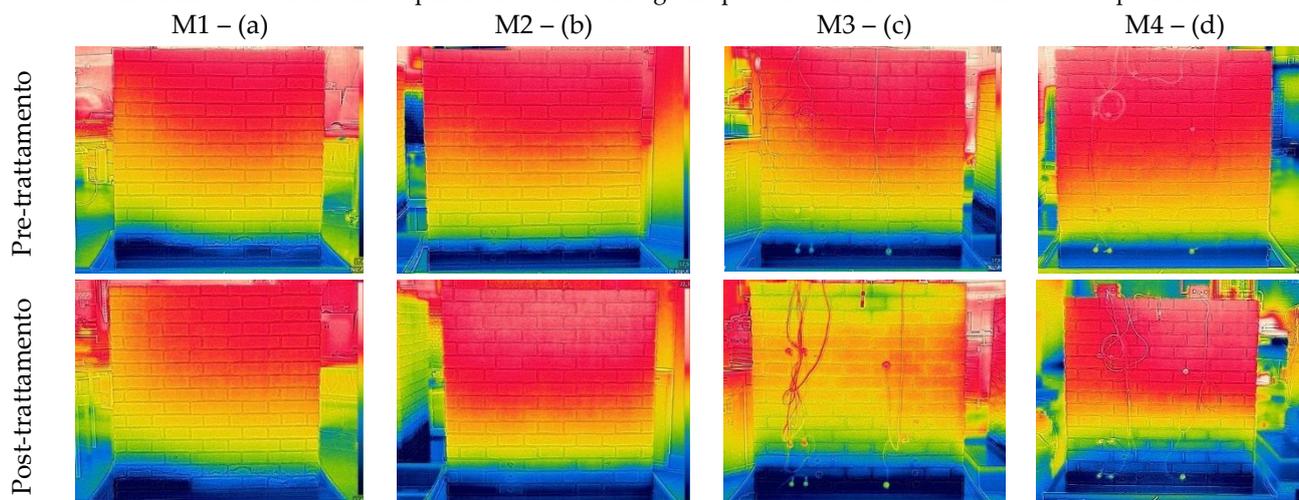


Figura 64. Analisi temperatura superficiale normalizzata nei modelli di muratura, dopo 1 anno di imbibizione.

#### 7.4.2.5.3 Modelli in muratura "stimolati"

I trattamenti di "stimolazione" della risalita capillare come descritto nel § 7.3.1, hanno portato delle variazioni in tutti i casi analizzati, ma non così accentuate da comportare dei cambiamenti dal punto di vista fisico nella muratura analizzata. In Tabella 49 si riportano alcune immagini termografiche pre e post-trattamento per monitorare i mutamenti nel tempo; tutte le immagini post-trattamento sono state eseguite dopo 40 giorni di analisi (ad esclusione di M4 in cui il test è durato un anno), ossia al termine della sperimentazione, ma nel caso di M1 è bene considerare che si tratta di una prova non reversibile (salificazione dell'acqua), in quanto determinerà continue trasformazioni nel tempo.

Tabella 49. Termografie IR sulle murature di prova in laboratorio, pre e post-trattamento (40 giorni) di “stimolazione” della risalita capillare. In M4 la termografia post-trattamento è stata effettuata dopo 1 anno.



- La salificazione dell’acqua dolce in M1 ha comportato delle variazioni di discontinuità per quanto riguarda il fronte di risalita: appare netto fino al III-IV corso di mattoni, manifestando alcune differenze tra la parte destra e sinistra. Si possono osservare sostanziali differenze di contenuto salino in superficie, con la manifestazione di efflorescenze (con correlata disgregazione del mattone) e la comparsa di patina biologica nella zona esposta a maggiore radiazione diffusa. Tale sintomo è derivato dalla presenza di additivi cementizi all’interno della malta, che reagendo in ambiente umido danno origine ad alluminati di calcio idrati (bi-calcico e tri-calcico), formando il sale complesso ettringite, i cui cristalli hanno un volume doppio rispetto al materiale originale, rompendo il materiale in superficie.
- L’impermeabilizzazione laterale in M2 non ha dato origine ad alcun tipo variazione per quanto riguarda il fronte (III-IV corso di mattoni), ma una diminuzione delle efflorescenze saline.
- La simulazione effetto pioggia in M3 ha comportato alcune variazioni superficiali: un leggero aumento del fronte di risalita di circa  $\frac{1}{2}$  corso di mattone, con un rapido aumento soprattutto nel giunto di malta. Si osservano delle temperature superficiali più basse anche nella parte alta della muratura, in quanto la bagnatura della parete, avvenuta dall’alto, ha comportato un maggior ristagno di acqua anche nella parte orizzontale superiore, imbibendo il materiale in profondità. Come in M2, sono diminuite le efflorescenze saline perché lo scorrimento superficiale di acqua ha dilavato le stesse. Al termine del dilavamento, la situazione è ritornata come nella situazione iniziale, senza innescare fenomeni di risalita ulteriori.
- La variazione delle condizioni al contorno in M4 determina un lento aumento del fronte di risalita, che si mantiene abbastanza costante se il livello di RH rimane elevato, ma ritorna allo stato iniziale quando RH torna alle condizioni iniziali di sperimentazione in laboratorio.

Tutti i casi analizzati dimostrano come le singole variazioni dell'ambiente al contorno non siano variabili fondamentali ad innescare il fenomeno di risalita capillare, ma la loro simultaneità può aggravare il fenomeno.

#### 7.4.2.6 *Altre tecniche non invasive*

Altre sonde igrometriche utilizzate per investigare il contenuto di umidità dal gruppo di ricerca UniVe, sono:

- Igrometro Testo 606-2, per la misurazione superficiale dell'umidità dei materiali (0-1 cm);
- Misuratore di umidità a induzione elettromagnetica Testo 616 (fino a 5 cm di profondità), che sfrutta la capacità delle molecole d'acqua di attenuare i campi magnetici;
- Sonda a microonde Trotec T610 (fino a 25 cm di profondità), che eccita le molecole d'acqua e ne individua il segnale.
- Camera iperspettrale SPECIM IQ 400-1000 nm, per la valutazione superficiale del livello di risalita capillare;
- Spettro radiometria in riflettanza Vis-SWIR 350-2500 nm, per la determinazione delle proprietà dei materiali costruttivi e di eventuali efflorescenze presenti.

In generale, anche da questi monitoraggi emerge come dopo un anno di imbibizione le pareti in muratura hanno raggiunto una situazione di equilibrio in relazione a suzione-evaporazione, con presenza di efflorescenze nell'area umida alla base del modello.

#### 7.4.2.7 *Monitoraggio invasivo*

Il metodo di misurazione ponderale permette di determinare il contenuto di umidità [%] all'interno della struttura. Considerando la natura distruttiva della prova, la prima valutazione del contenuto igrometrico (Moisture Content [%]) è stata effettuata dopo 12 mesi di imbibizione delle pareti, a profondità di penetrazione ~0-2 cm, 2-5 cm, 5-10 cm e 10-15 cm, mediante trapanatura a bassa velocità (< 250 giri/min, in modo da non alterare il contenuto d'acqua nel campione), con punta Ø 1 cm. I campioni vengono pesati dopo il prelievo, asciugati in forno a  $T < 100^{\circ}\text{C}$  e nuovamente pesati, per determinare la quantità di acqua evaporata. La valutazione ponderale della presenza di umidità è determinata come descritto al § 2.1.1.

M1-M6 nonostante la differente tipologia di malta premiscelata mostrano mediamente un profilo simile, con una saturazione d'acqua nei mattoni fino al III corso, che decresce progressivamente già dal IV corso in poi. I valori del contenuto d'acqua (MC) variano però in base alla malta di allettamento: nel III corso, in M3-M6 si registra un 15-25% di umidità a tutte le profondità investigate, mentre in M1-M2 un 5-10%; nel IV corso, si ha in media  $\text{MC} = 0.2-1.8\%$ ; nel V corso  $\text{MC} = 0.2-0.6\%$ .

I modelli realizzati con malta di calce aerea tradizionale (M7-M8), come nel caso precedente il III corso di mattoni è completamente saturato, ma in questo caso si nota un contenuto d'acqua maggiore fino al VI-VIII corso, con  $\text{MC} = 2-3\%$ .

Altre differenze sono riscontrabili nei modelli M9-M10 con malta di calce aerea tradizionale e mattoni di recupero: anche in questo caso il III corso è completamente saturo d'acqua, ma salendo verso l'alto, la diversa composizione del mattone determina una variabilità della distribuzione capillare, con MC che variano a seconda del punto in cui viene effettuato il prelievo. Nel caso qui analizzato, si ha al VI corso un MC > 5% e al VIII corso MC = 3%.

Anche nei modelli di muratura intonacata si ha una completa saturazione nel mattone del III corso, ma in questo caso la presenza dell'intonaco superficiale determina un aumento della risalita capillare in superficie, e quindi un maggior contenuto d'acqua anche nei mattoni sottostanti, nonostante la struttura alla base sia realizzata con malta premiscelata. Il campionamento superficiale nell'intonaco (0-2 cm) fa registrare un MC più elevato nel cocciopesto, correlato all'elevata porosità rispetto agli altri intonaci. La presenza di uno strato molto sottile di intonaco modifica completamente l'equilibrio dell'umidità di risalita, riducendo l'evaporazione dalle superfici e agendo come strato di distribuzione preferenziale per l'umidità.

In generale, un contenuto d'acqua > 5% indica un mattone umido, mentre > 15% un mattone completamente impregnato d'acqua. Rispetto alla profondità di prelievo, si registrano valori maggiori nel punto più interno alla muratura; distribuzione spesso riscontrata in studi precedenti (§ 5.2), ed è tipica di un sistema in cui vi è maggiore evaporazione dalle superfici esterne.

La valutazione ha quindi permesso di evidenziare come il comportamento dei sistemi non sia omogeneo, indipendentemente dalla malta con cui sono stati realizzati; tale osservazione ricalca quindi quanto eseguito con le diagnosi non invasive. Utilizzare tale metodo per identificare l'esatta posizione del fronte capillare è difficile, in quanto sarebbe necessario eseguire fori su tutti i corsi di mattoni; questo può essere impiegato per dare un'informazione quantitativa del contenuto d'acqua all'interno della muratura, dopo aver utilizzato i monitoraggi non distruttivi per localizzare le aree umide.

## 7.5 Sistemi di trattamento

Con l'obiettivo di analizzare il funzionamento e gli effetti dei sistemi di trattamento diffusi in commercio, sono state applicati due differenti dispositivi su alcuni modelli di muratura in laboratorio.

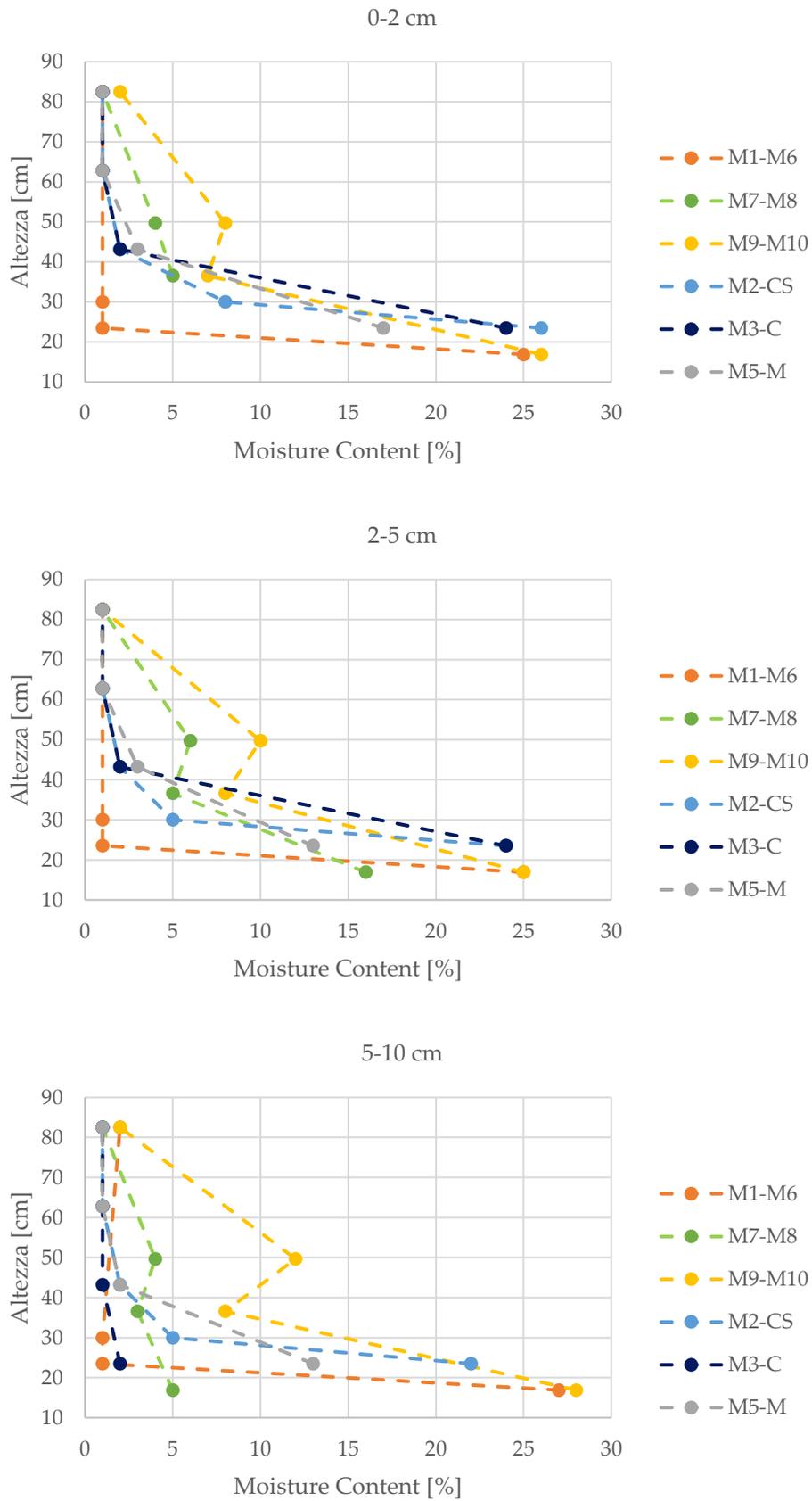
Tabella 50. Sistemi di trattamento applicati in laboratorio.

<b>Tecnologia</b>	<b>Modello muratura</b>	<b>Condizioni al contorno (T-RH)</b>
Passiva – (A)	M7	T = 21.5 ± 2.3 °C, RH = 48 ± 10%
Passiva – (B)	M8	T = 14.9 ± 9°C, RH = 59 ± 3%

### 7.5.1 Sistema di tipo "passivo"

I sistemi valutati sono di tipo elettrofisico (§ 3.3.2), ossia relativi al movimento di particelle all'interno di un fluido (molecole di acqua), sotto l'azione di un campo elettrico. Sono state analizzate tecnologie di tipo "passivo", ossia che sfruttano le condizioni naturali terrestri e no,

Tabella 51. Dati MC% sui modelli di muratura analizzati in laboratorio.



sono collegate direttamente a campi elettrici. Operano mediante inversione del movimento delle molecole d'acqua nei capillari, sfruttando il potenziale elettrico naturale che si crea tra fluido e solido. L'umidità in eccesso nella parete sarà espulsa naturalmente mediante evaporazione e le efflorescenze con sistemi meccanici/chimici.

Hanno un raggio d'azione sferico di ~5.00 m e sono completamente non invasive, in quanto non alterano la natura del modello in muratura, né dal punto di vista estetico che costruttivo. Per valutare quali effetti possono apportare le tecniche alle murature, i modelli sono stati distanziati tra loro in modo che non possano portare interferenze uni agli altri. Entrambi i sistemi (A) e (B) sono composti da un apparecchio che sfrutta campi energetici naturali (onde magneto-gravitazionali) per equilibrare la differenza di potenziale. Il sistema (A) è posizionato sul lato trasversale del modello in muratura, direttamente a contatto con la superficie dello stesso. Il sistema (B) è posizionato a ~0.85 m sopra il modello, orientato a Nord.

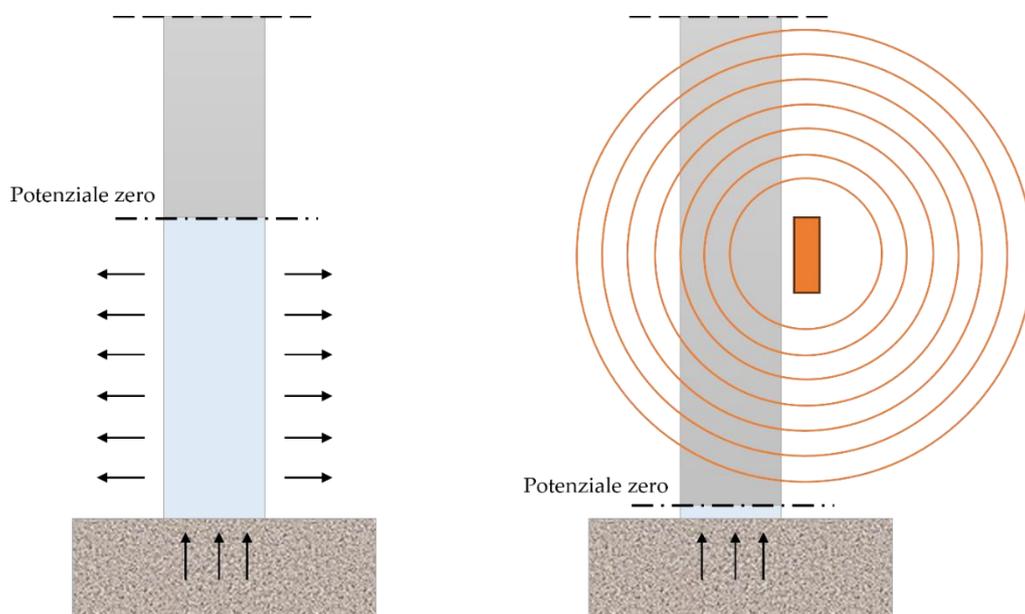


Figura 65. Funzionamento sistemi di trattamento applicati sulle murature in laboratorio.

## 7.5.2 Monitoraggio efficacia del sistema di trattamento

L'applicazione delle tecnologie di trattamento "passivo", come descritto al § 0 non hanno mostrato particolari variazioni del contenuto umido in superficie e all'interno della muratura, utilizzando i metodi di indagine sopra descritti.

I monitoraggi hanno previsto l'utilizzo delle tecniche come al § 3.3.2.

### 7.5.2.1 Analisi resistiva/capacitiva

Mediante il termoigrometro Protimeter e l'igrometro Gann è stato valutato il contenuto di umidità superficiale (max 3-4 cm in profondità della massa muraria).

La Figura 66 mostra l'andamento del contenuto superficiale di umidità registrato con Protimeter, riferito ai primi tre corsi di mattoni sopra il pelo libero dell'acqua: l'umidità registrata rimane sempre sopra il livello indicato come "umido" in tutti i livelli analizzati (> 29 WME%), per entrambe le murature. Come riportato anche al § 7.4.2.3, il III corso risulta quello

più impregnato, con addirittura un andamento crescente a partire dal 6°-7° mese di analisi; i due corsi superiori (IV-V) mostrano leggere fluttuazioni correlate alle condizioni al contorno ma con valori più o meno stabili, compresi tra 20 e 40 WME%.

Con l'igrometro Gann è stato riscontrato un andamento molto simile tra i due modelli in muratura, affermando ciò che è stato osservato anche con i monitoraggi precedenti: in Figura 67 si nota come a tutti i livelli di altezza analizzati le misurazioni siano quasi uguali tra loro, registrando un aumento del contenuto di umidità superficiale dopo circa 5 mesi di analisi, raggiungendo valori > 50 digit (un materiale è considerato umido se > 40 digit); si ha una leggera diminuzione tra l'8° e 10° mese, con una registrazione del materiale asciutto superficialmente (corrispondente ai mesi di Luglio-Settembre), per poi aumentare nuovamente nei mesi più freddi con aumento dell'umidità superficiale.

Tali dispositivi sono garantiti con evidenza del risultato dopo circa 6 mesi; la sperimentazione in laboratorio con monitoraggio mediante metodo resistivo e capacitivo dopo 12 mesi non ha dimostrato l'efficacia del dispositivo in atto, in quanto il contenuto di umidità superficiale non è diminuito nel periodo analizzato.

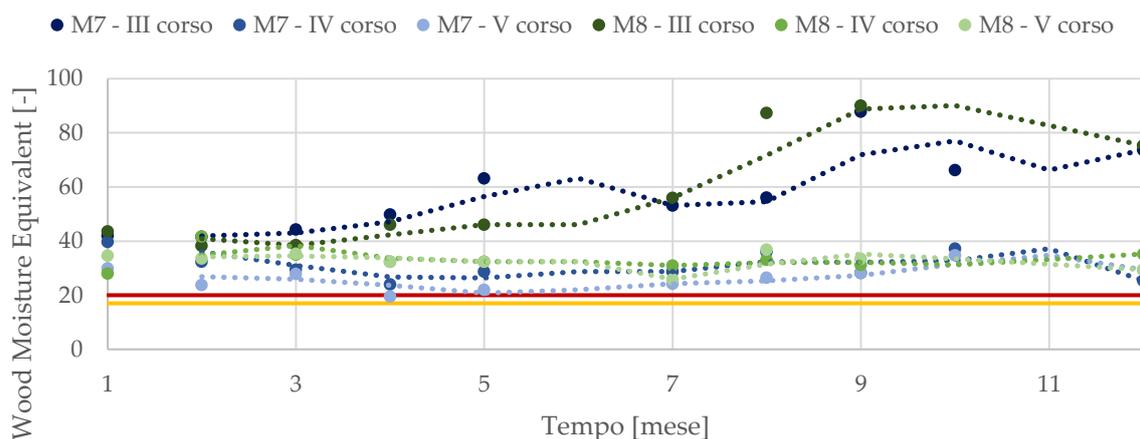


Figura 66. %WME dei modelli in muratura M7-8, nel periodo di applicazione dei sistemi passivi.

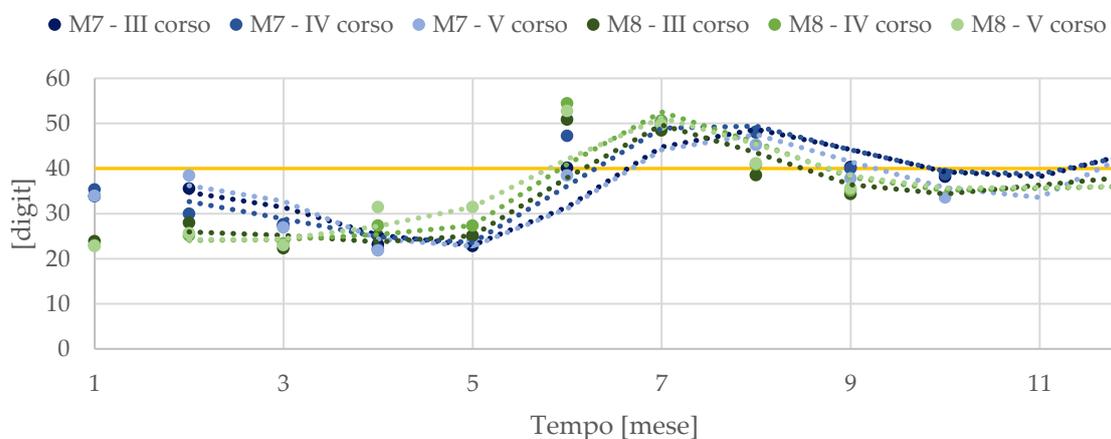


Figura 67. Umidità superficiale [digit] nei modelli M7-8, nel periodo di applicazione dei sistemi passivi.

### 7.5.2.2 Analisi termografica

Mediante termocamera è stato possibile riscontrare una variazione della temperatura superficiale e del flesso corrispondente alla zona di bagnasciuga (**Errore. L'autoriferimento non è valido per un segnalibro.**), ma principalmente correlato alle condizioni microclimatiche al contorno che non al dispositivo tecnologico in sé.

Dai grafici in Figura 68 e Figura 69, in cui la temperatura superficiale è stata normalizzata (come al § 7.4.2.5), si può notare una variazione della temperatura superficiale, corrispondente alle condizioni microclimatiche al contorno, ma l'area umida superficiale rimane invariata. Per valutare l'efficacia di tali sistemi mediante termografia è stata valutata la variazione di temperatura superficiale tra minimo e massimo. Si considera una muratura affetta da risalita capillare se tra la parte umida (zona di evaporazione) e la regione asciutta sussiste un  $\Delta T \geq 2^\circ\text{C}$ . In Tabella 53 è possibile notare come le variazioni di temperatura a tempo 0 (inizio della valutazione, prima dell'applicazione dispositivo) e dopo 12 mesi di trattamento siano  $> 2^\circ\text{C}$  in entrambi i modelli considerati, con due tipologie di sistemi differenti.

Anche mediante l'utilizzo della termografia come metodo di monitoraggio non è stato possibile dimostrare l'efficacia del dispositivo dopo un anno di sperimentazione.

Tabella 52. Analisi termografica su modelli di muratura in laboratorio in cui sono applicati sistemi di trattamento passivo della risalita capillare.

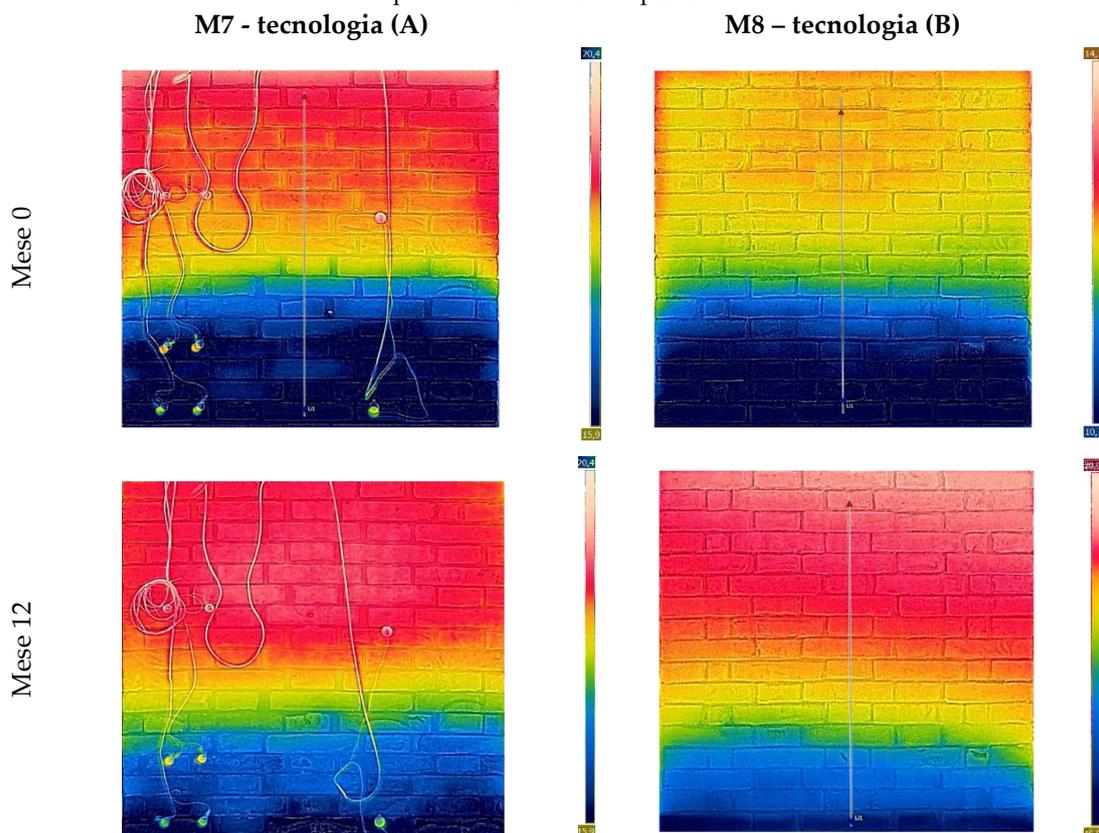


Tabella 53. Variazioni di temperatura superficiale ( $\Delta T$  [°C]) nei modelli di muratura trattati con sistemi elettromagnetici "passivi".

Tecnologia	Modello muratura	$\Delta T$ [°C]	
		Mese 0	Mese 12
Passiva – (A)	M7	3.38	3.21
Passiva – (B)	M8	2.03	2.88

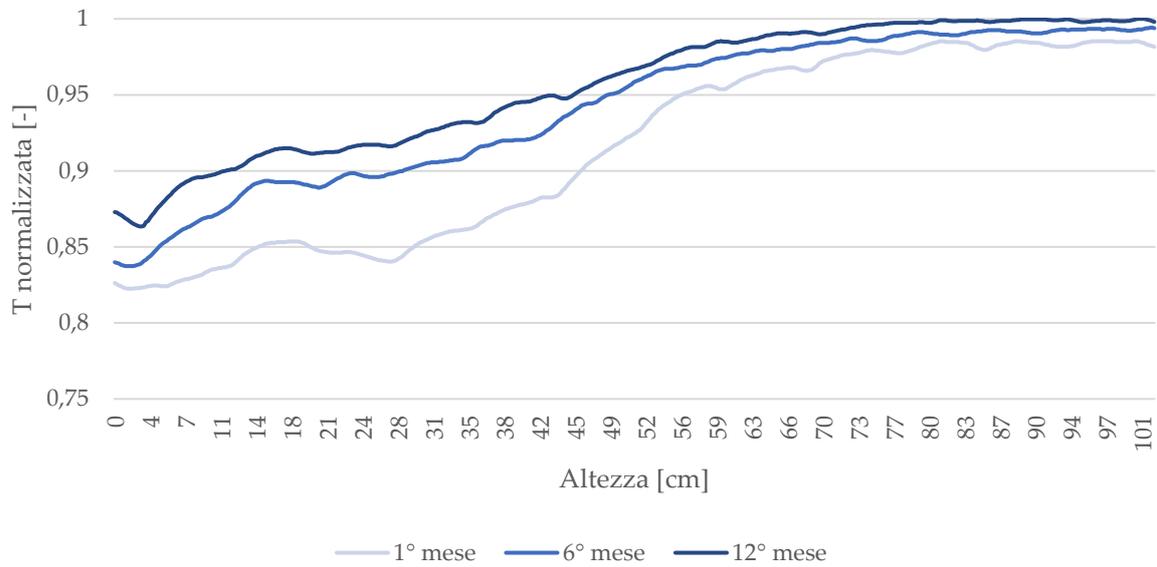


Figura 68. Temperatura superficiale normalizzata ( $T_n$ ) del modello di muratura M7, con applicazione del sistema passivo (A).

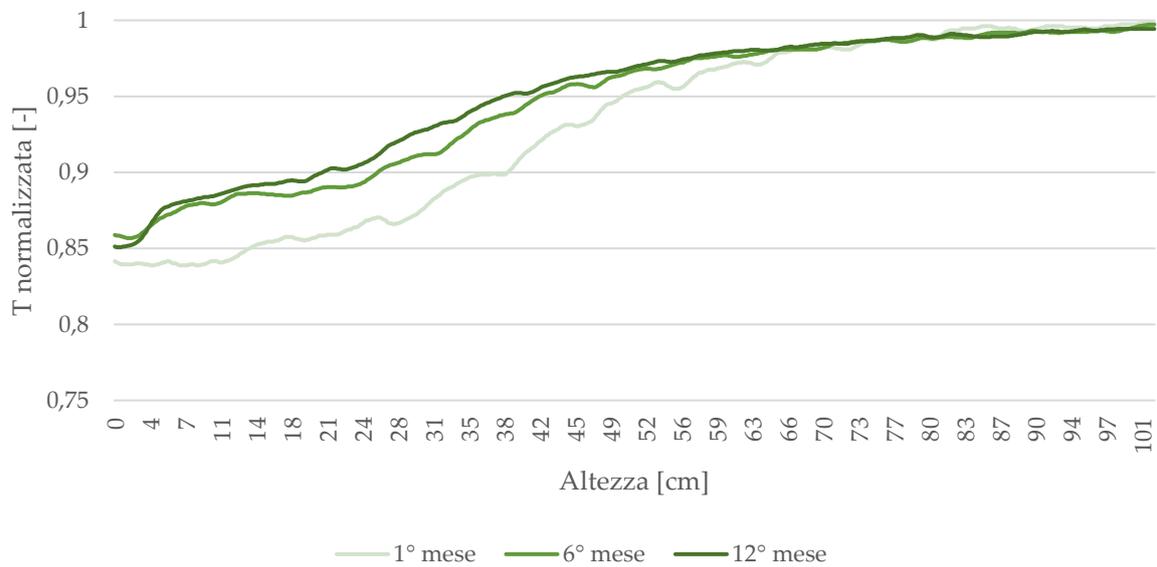


Figura 69. Temperatura superficiale normalizzata ( $T_n$ ) del modello di muratura M8, con applicazione del sistema passivo (B).

## 7.6 Risultati

La limitata quantità di variabili al contorno dei modelli in muratura e la conoscenza dei materiali costruttivi utilizzati, permette di comprendere maggiormente, ma non ancora in forma completa, la relazione che intercorre tra le tecniche di monitoraggio scelte e i risultati ottenuti. In questo modo è stato possibile appurare quali tecnologie forniscano risultati chiari e leggibili, sia dal punto di vista qualitativo che quantitativo, con l'obiettivo di una diretta applicazione in campo in seguito a opportuna calibrazione degli strumenti scelti.

I diversi esperimenti effettuati a partire da singoli materiali fino ai modelli di muratura informano sulle differenze comportamentali per quanto riguarda la cinetica dei fenomeni di risalita capillare in ambiente noto, e quindi strettamente correlate alle caratteristiche intrinseche.

Il mattone da restauro, data la sua struttura porosa uniforme, tende ad assorbire una notevole quantità di acqua a velocità elevate; caratteristica osservabile sia mediante prova di assorbimento capillare e totale, sia nella prima fase di imbibizione dei modelli in muratura, in cui il primo corso di mattoni risulta saturo già dopo circa 1 ora. Alcune differenze si notano invece nei modelli con mattoni di recupero: data la provenienza sconosciuta, potrebbe appartenere a fabbriche differenti, nonché essere stato soggetto in passato a fenomeni differenti. Già da un'analisi visiva è possibile osservare come la lavorazione superficiale sui vari mattoni sia diversa, con alcuni di questi che sembrano essere cotti a temperature molto più elevate di altri, determinandone una differente struttura porosimetrica. È una situazione facilmente riscontrabile nella realtà, visti i continui restauri a cui sono soggetti edifici delle epoche passate, con forti eterogeneità sia da un punto di vista fisico che chimico.

Le malte premiscelate mostrano una minor capacità di assorbimento dell'acqua, sia da test su provino che su modelli in muratura, comportamento probabilmente correlato alla presenza di componenti idrorepellenti all'interno del materiale. Una notevole differenza si nota invece con l'utilizzo di malta di calce aerea tradizionale, in grado di assorbire una notevole quantità di acqua a velocità elevate.

Infine, è possibile considerare come gli intonaci utilizzati nei modelli hanno favorito la risalita capillare, con un comportamento molto simile alla malta di allettamento in malta di calce aerea.

La stimolazione di muretti di prova fornisce un'importante metodologia di valutazione della vulnerabilità a specifiche condizioni ambientali/stressori, valutazioni altrimenti solo deducibili da murature di edifici reali, in quanto più variabili agiscono contemporaneamente impedendo quindi l'analisi di ogni singola condizione ambientale.

In generale, affinché si verifichi risalita capillare continua in una struttura muraria, è necessario il contatto tra i materiali, che risulta comunque rallentata se la composizione degli stessi è diversa. Un rivestimento superficiale poroso, intonaco in questo caso, si comporta come elemento di collegamento alla muratura sottostante, determinando un innalzamento del fronte di risalita perché il fluido si distribuisce molto facilmente in un materiale omogeneo. Questo dato mette in luce come l'intonaco abbia un duplice ruolo: protettivo della muratura e

di mezzo di trasporto per l'acqua. L'applicazione richiede perciò un bilanciamento tra estetica e conservazione, come chiave di lettura della "sostenibilità" degli interventi.

Anche l'area di evaporazione gioca un ruolo fondamentale nella suzione: nel caso dei modelli in laboratorio, caratterizzati da una superficie esposta elevata, la risalita risulta limitata una volta raggiunto l'equilibrio (circa 1 mese). Situazione più difficoltosa da ottenere in campo reale, in quanto le strutture hanno le superfici esposte a differenti condizioni al contorno (ambiente interno ed esterno), e le sezioni trasversali non sono esposte.

L'altezza di risalita è quindi il bilancio dei fenomeni descritti: metodo di diffusione dell'acqua nei materiali (mattoni, malta, intonaco) ed evaporazione superficiale. Il risultato dipenderà dalle diverse velocità di azione dei fenomeni.

Questa sperimentazione dà importanti informazioni per quanto riguarda i materiali costruttivi e il loro utilizzo nel restauro delle murature storiche, che spesso richiedono materiali sostenibili e compatibili con l'esistente. Vista l'efficacia delle malte premiscelate di interrompere il flusso capillare data la struttura idrorepellente, si possono considerare come un'ottima alternativa per limitare l'impatto estetico nella ricostruzione (presenza nella muratura < 10%). È invece da sconsigliare l'utilizzo di intonaci cementizi o con additivi idrorepellenti, in quanto presentano una serie di svantaggi, tra cui elevata densità, resistenza a compressione, maggiore adesione al supporto e impermeabilità all'acqua, tutti elementi che le rende poco adatte all'edilizia storica. La maggior densità rispetto alle calce tradizionali comporta una diminuzione della permeabilità e una riduzione del comfort interno. L'elevata resistenza a compressione comporta la formazione di una struttura più pesante, che potrebbe dare origine a ritiri del materiale con formazione di fessure/cavillature, rigonfiamenti e distacchi. Infine, la limitata permeabilità determina una maggior evaporazione della soluzione attraverso il mattone, in quanto più poroso rispetto alle nuove malte cementizie, comportando un consumo e distruzione del mattone piuttosto che il giunto tra questi, implicando una più difficile sostituzione o riparazione.

Ultima considerazione riguarda l'applicazione dei sistemi di trattamento passivo sui modelli in muratura. Tali tecnologie, non hanno mostrato particolari variazioni del contenuto umido in superficie e all'interno della muratura. Infatti, le medesime variazioni superficiali riscontrate mediante i metodi di monitoraggio non invasivo, si presentano anche sui modelli in cui non sono applicate tecnologie di trattamento. Ciò sottolinea la difficoltà di riscontrare il funzionamento di simili apparati quando ci sono differenti variabili al contorno (es. variazioni microclimatiche) che influiscono sull'oggetto considerato.

## 8. Sperimentazione su casi studio in campo

*Le tecniche di monitoraggio non invasivo precedentemente descritte e analizzate in laboratorio (termografia IR e sistemi resistivi), forniscono un importante supporto alla valutazione sulla presenza di umidità di risalita nel costruito, soprattutto in edifici di carattere storico-culturale in cui è fondamentale la conservazione dell'esistente. La diagnosi richiede però una approfondita conoscenza della strumentazione utilizzata e dell'edificio che si sta indagando. Si tratta di una situazione difficilmente riscontrabile nel caso reale, visti i ripetuti restauri a cui sono state sottoposte le fabbriche nelle varie epoche e le complicazioni nel reperimento di dati relativi a materiali e tecnologie adottate. In questo capitolo si vogliono sperimentare direttamente "in situ" questi sistemi di diagnosi, nel contesto lagunare Veneziano, con lo scopo di valutare anche alcuni dispositivi di trattamento e verificarne l'eventuale efficacia nel tempo.*

Ogni edificio ha subito nel corso degli anni una serie di modifiche sia a livello storico che strutturale, documentabili attraverso un'attenta osservazione delle tecniche e materiali adottati nei differenti periodi o con indagini di tipo archivistico. Non è spesso scontato trovare molte di queste informazioni; infatti, negli anni si è persa moltissima documentazione sulle opere eseguite in un determinato immobile, rendendo difficoltosa la diagnosi e la possibilità di pianificare monitoraggi e interventi compatibili con l'esistente.

## 8.1 Teson Grande - Lazzaretto Nuovo

### 8.1.1 Informazioni generali

L'isola del Lazzaretto Nuovo, localizzata a nord nella Laguna Veneta, è un'isola di circa nove ettari che in passato fungeva da zona di "quarantena" per le navi provenienti dal Mediterraneo, prima dell'ingresso a Venezia. Durante il dominio napoleonico e austriaco nell'Ottocento, l'isola viene utilizzata principalmente per scopi militari, come parte del sistema difensivo lagunare. Dismessa e abbandonata fino al 1988, in cui venne data in concessione per lo svolgimento di campi archeologici estivi [158].



Figura 70. Isola del Lazzaretto Nuovo nella Laguna Veneta.

Il Teson Grande, l'edificio più grande presente nell'isola di dimensioni 100 x 20 m, era in passato utilizzato come luogo di deposito per le merci sospette di essere portatrici del morbo della peste. La sua attuale funzione è spazio espositivo/museale (principalmente aperto nella stagione estiva) e in parte deposito di materiale della Soprintendenza Beni Culturali; tali destinazioni d'uso non necessitano climatizzazione invernale/estiva.



Figura 71. Stato di conservazione del Teson Grande durante i monitoraggi eseguiti nel 2021/2022: (a) e (b) parete perimetrale, (c) foratura del giunto di malta per determinazione MC%, (d) esterno, (e) base di un pilastro portante interno.

La struttura originaria a doppio spiovente con arcate laterali aperte per assicurare la ventilazione naturale è stata modificata intorno al 1700 con il tamponamento delle stesse. Le murature sono realizzate con mattoni vari di argilla (a seconda dell'epoca di utilizzo) e malta di calce (spessore ~25 cm), non tutti della stessa datazione; si notano infatti diversi interventi di sostituzione del materiale, anche con interventi meccanici di scuci-cuci e l'utilizzo di malta di allettamento cementizia. Alcune parti dell'edificio appaiono intonacate in modo disomogeneo con calce aerea, cocchiopesto e intonaci cementizi.

### 8.1.2 Monitoraggio

I sopralluoghi sono stati effettuati a luglio e settembre 2021, e marzo 2022 contemporaneamente all'installazione di un dispositivo ad elettrosmosi passiva per la limitazione della risalita capillare. La tecnologia applicata è la stessa descritta al § 0, di tipologia (A).

I monitoraggi hanno previsto l'analisi della struttura portante (pilastri) e di tamponamento; sono stati eseguiti in maniera puntuale, mediante termoigrometro per la registrazione del microclima interno (T-RH) e analisi resistive superficiali, e termocamera IR per

l'individuazione della zona di evaporazione superficiale. I principali degradi osservabili nella struttura sono efflorescenze saline, erosione del mattone e patina biologica.

L'azienda partner ha eseguito ulteriori monitoraggi, sia di tipo invasivo che non invasivo. Le prime includono l'analisi gravimetrica del contenuto di umidità nella muratura mediante foratura della malta di calce a differenti altezze (25-115-210-310 cm) e profondità (1-3, 8-16 cm), eseguite in due momenti temporali differenti: prima dell'applicazione del sistema di trattamento ad elettrosmosi passiva (anno 2021-2022) e dopo l'applicazione del sistema (anno 2023), con ulteriore confronto di questa con una zona neutra della struttura, in cui non vi è l'azione del sistema. Le analisi non invasive hanno previsto la misurazione del potenziale elettrico verticale e misure resistive.

In Figura 72 si riportano i punti in cui sono state eseguite le analisi descritte.

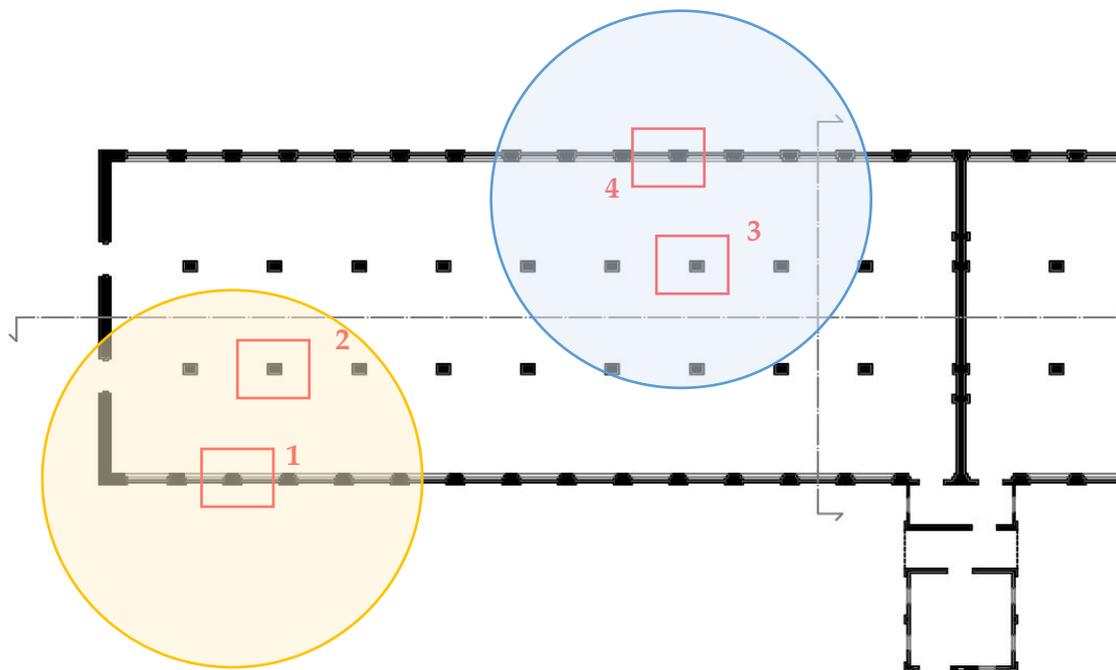


Figura 72. In rosso, punti di analisi presso il Teson Grande (lato destinazione d'uso a museo); in giallo, area di influenza della tecnologia passiva (B); in blu, area neutra di "controllo" con data logger in continuo.

In due aree dell'edificio sono stati applicati due sistemi di controllo in continuo (timestep giornaliero) che forniscono indicazioni sull'impedenza elettrica all'interno della muratura, per valutare l'eventuale flusso di risalita capillare. La tecnologia di monitoraggio è la stessa applicata sui modelli di muratura in laboratorio (§ 0), con elettrodi a spazzola inseriti in profondità nei giunti di malta a differenti altezze: ~15 cm, ~72 cm, ~140 cm e ~215 cm.

### 8.1.3 Analisi dei risultati

I vari monitoraggi hanno registrato un basso contenuto di umidità (~ 3%, associabile al contenuto di umidità fisiologica del materiale indagato) nella struttura sia esposta a sud-est (area di influenza dispositivo di trattamento) che a nord-ovest (area neutra), che aumenta leggermente nella parte inferiore a contatto con la pavimentazione (MC max = 10%). Il contenuto umido all'interno della muratura mostra la medesima tendenza riscontrata nei casi

studio Veneziani riportati al § 5.2, ossia una proporzionalità diretta tra MC% e altezza del campionamento.

I campionamenti eseguiti, come riportato in Figura 73, mostrano una diminuzione del contenuto umido all'interno della muratura, sia nella parte superficiale (1-5 cm) che più in profondità (8-16 cm), con il passare del tempo. L'applicazione del dispositivo id trattamento sembra aver diminuito notevolmente il contenuto d'acqua, con una diminuzione media della parte analizzata di circa il 45%. Tale valutazione è effettuata mediante comparazione de risultati a due anni di distanza. Simile considerazione anche per l'area considerata come "zona neutra", ossia ove non vi è l'influenza del dispositivo elettrosmotico: anche in questo caso, infatti, si registra una diminuzione del contenuto d'acqua nella muratura, con una variazione media del 20%. Nonostante la diminuzione sia inferiore, è fondamentale considerare che in questo caso la comparazione avviene a distanza di un anno. Da tali risultati risulta difficile verificare l'efficacia dello strumento, in quanto i dati del contenuto umido sono molto limitati e probabilmente soggetti ad incertezze di misura degli strumenti utilizzati.

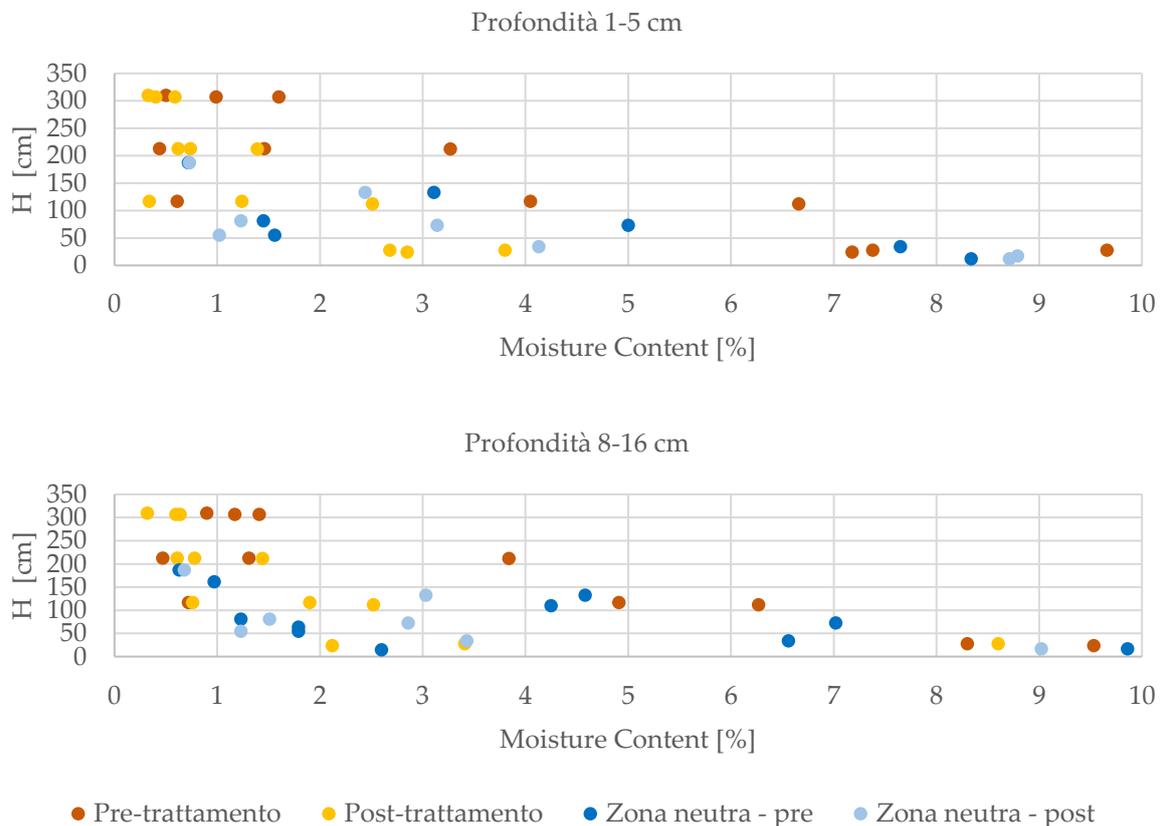


Figura 73. Relazione tra MC% e altezza di campionamento [cm] nel Teson Grande a differenti profondità, prima e dopo l'applicazione del sistema di trattamento ad elettrosmosi passiva (valori riferiti alle colonne centrali e ai tamponamenti laterali).

Tali analisi potrebbero essere influenzate dalle condizioni microclimatiche al contorno, di cui però non si ha un'analisi completa ed approfondita ed è quindi difficoltoso correlare il contenuto umido con variabili come temperatura e umidità relativa. Dal grafico in Figura 74 si osserva che la registrazione dei dati è avvenuta a partire da marzo 2022 ma in modo

puntuale, in quanto ci sono state difficoltà di rilevazione dei parametri per mancanza di connessione al sistema di rete.

Questo è uno dei problemi nel censimento dei dati necessari alla catalogazione di un immobile e delle sue caratteristiche per quanto riguarda il fenomeno di umidità di risalita: mancanza di dati confrontabili nel tempo.

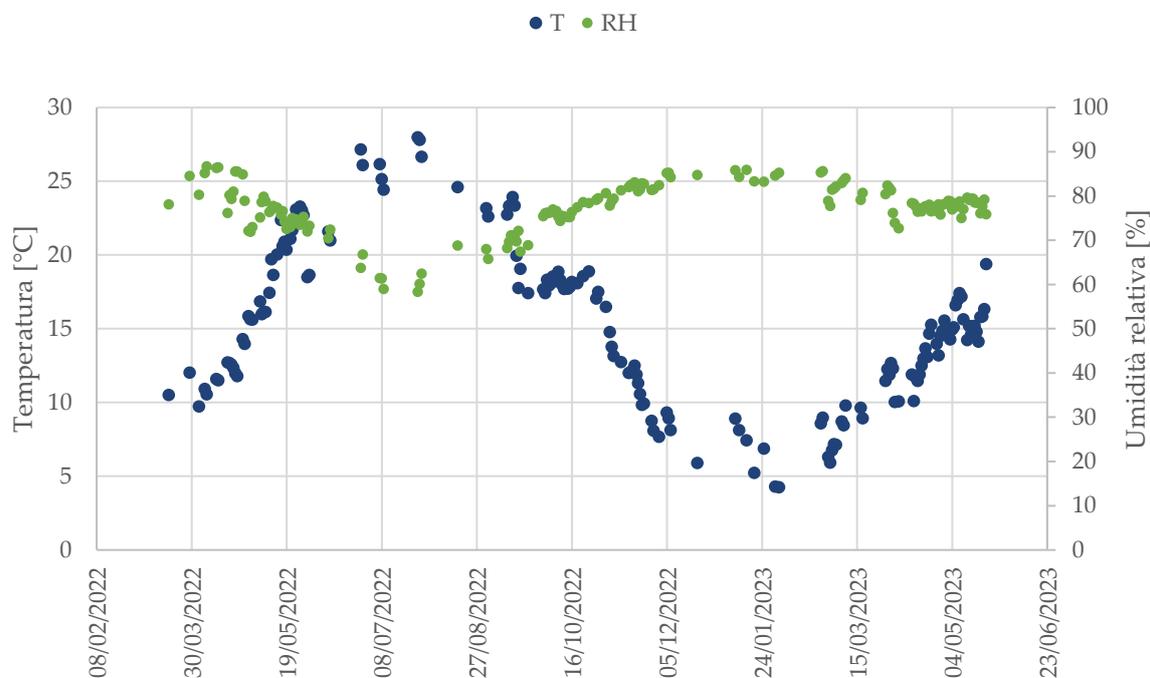


Figura 74. Temperatura e umidità relativa all'interno del Teson Grande, isola del Lazzaretto Nuovo.

Osservando singolarmente le giornate scelte per i prelievi ponderali, è possibile osservare un aumento delle temperature e dell'umidità relativa interne/esterne dall'inizio del campionamento (Tabella 54).

Tabella 54. Temperatura e umidità relativa registrate nei giorni di prelievo delle polveri con metodo gravimetrico.

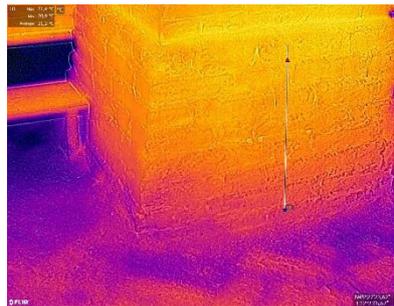
Data	Temperatura [°C]		Umidità relativa [%]	
	Interna	Esterna	Interna	Esterna
Settembre 2021	21.8	25.3	64.4	46.4
Marzo 2022	11.2	13.8	64.8	50.2
Luglio 2023	25.2	27.8	68.4	51.5
Ottobre 2023	23.1	-	74.3	-

Dalle immagini termografiche non si riesce a identificare un vero fronte di risalita; quindi, il contenuto d'acqua misurato mediante prova gravimetrica potrebbe essere correlato alla presenza di fenomeni condensativi. Dalle immagini in Tabella 55 infatti, è possibile osservare delle differenze di temperatura < 2°C lungo i profili verticali tracciati, sintomo che non è presente umidità di risalita capillare.

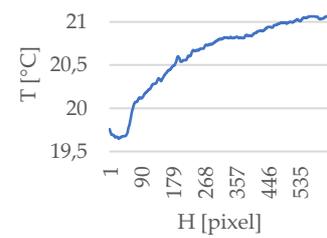
Tabella 55. Immagini fotografiche e termografiche dei vari punti di analisi all'interno del Tesoro Grande.  
 2021 – Pre-trattamento (T = 21.8°C, RH = 64.4 %)



Punto 1 –  $\Delta T = 0.84 \text{ } ^\circ\text{C}$



Punto 2 –  $\Delta T = 0.54 \text{ } ^\circ\text{C}$

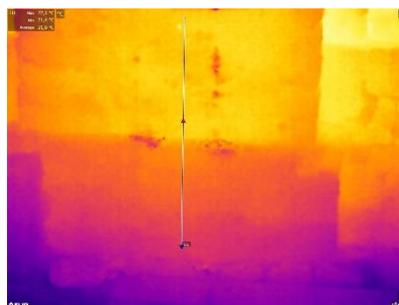


Punto 3 –  $\Delta T = 1.54 \text{ } ^\circ\text{C}$

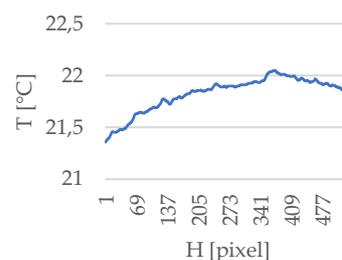
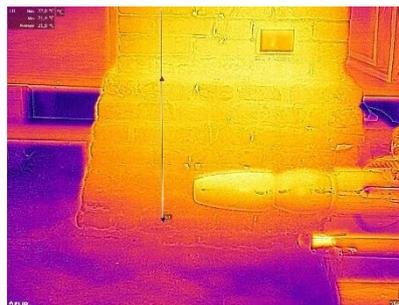


Punto 4 –  $\Delta T = 0.82 \text{ } ^\circ\text{C}$

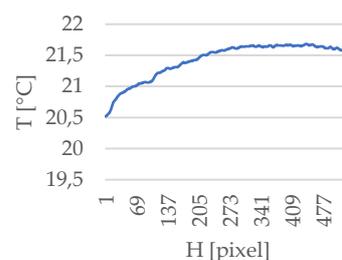
2023 – Post-trattamento (T = 23.1°C, RH = 74.3 %)



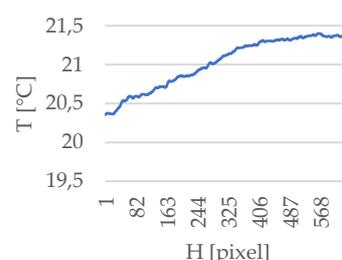
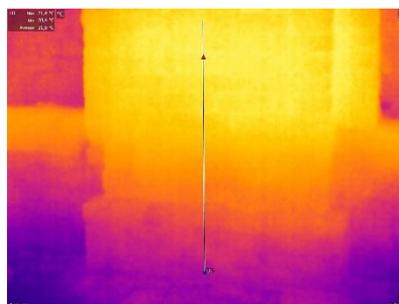
Punto 1 – zona trattata –  $\Delta T = 0.66$  °C



Punto 2 – zona trattata –  $\Delta T = 0.69$  °C

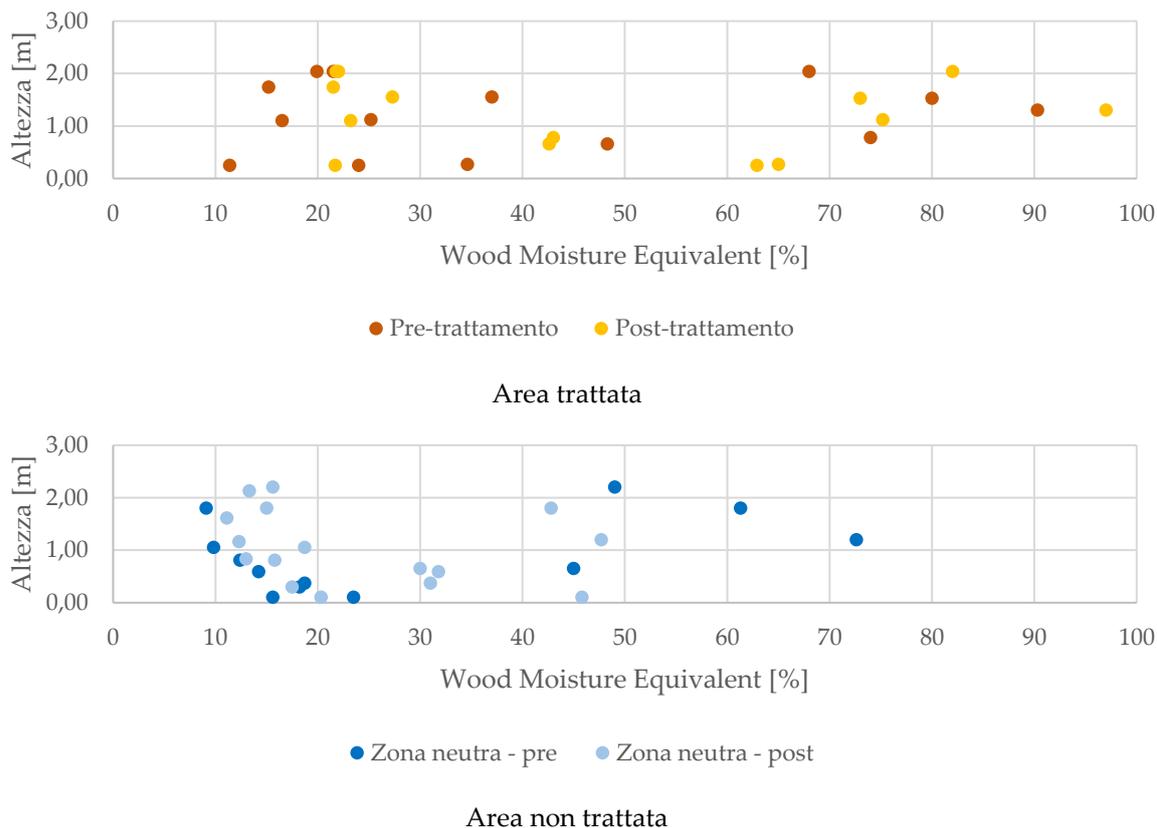


Punto 3 – zona neutra –  $\Delta T = 1.17$  °C



Punto 4 – zona neutra –  $\Delta T = 1.05$  °C

Le analisi superficiali resistive hanno registrato elevati livelli di umidità, ma strettamente correlati alla presenza di efflorescenze saline (cloruri, nitrati e tracce di solfati), come visibile in Figura 75. In entrambe le zone, trattata e no, non si osservano diminuzioni del contenuto umido superficiale correlato alla resistenza elettrica del materiale indagato, con la maggior parte dei valori che danno un'indicazione di muratura con elevati valori di umidità (> 20 WME%).



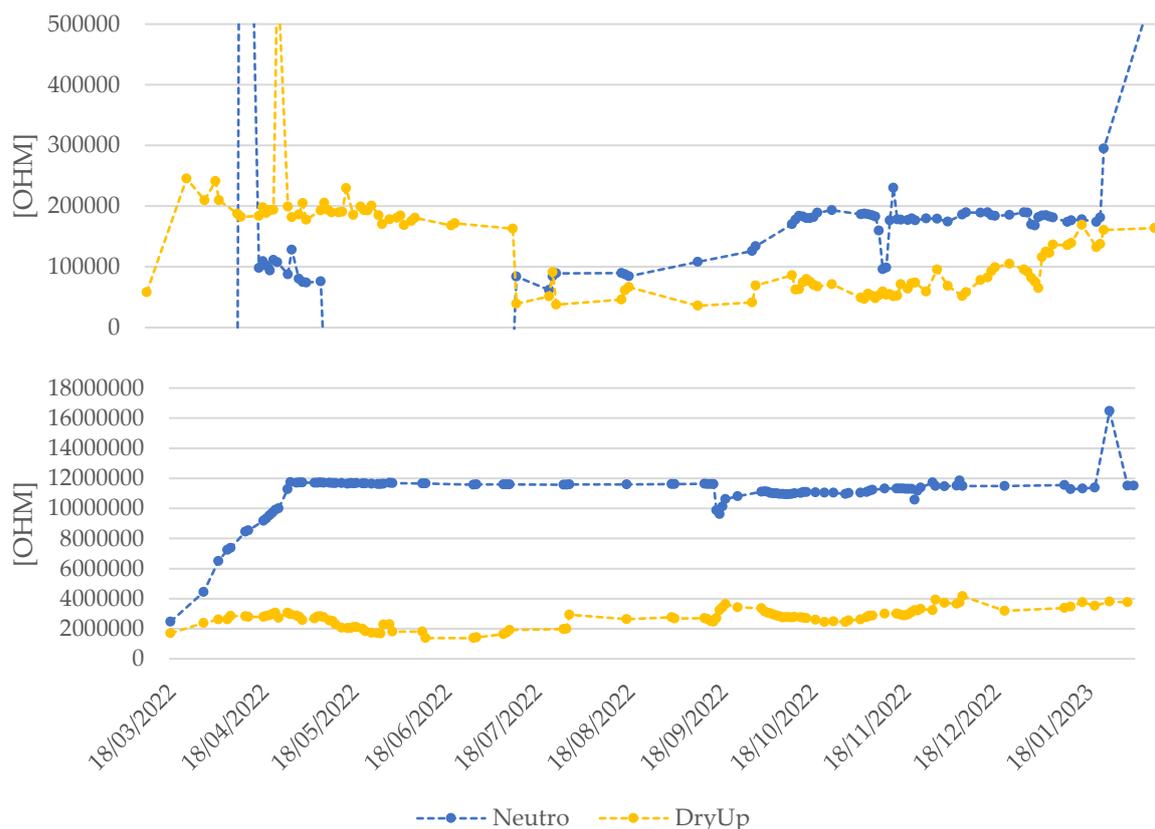


Figura 76. Impedenza tra due punti a differenti altezze, nelle due zone di analisi: grafico in alto H = 15 cm, grafico in basso H = 220 cm.

## 8.2 Chiesa S. Michele in Isola – Isola di S. Michele, Venezia

### 8.2.1 Informazioni generali

La chiesa, progettata dall'architetto Mauro Codussi e realizzata tra il 1468 e il 1479, ha una struttura interna in muratura (in alcune parti a vista), divisa in tre navate. Di fronte all'ingresso principale si trova un "barco" (vestibolo) con volte a crociera sostenute da pilastri marmorei. La facciata esterna in Pietra d'Istria tripartita, presenta due livelli sovrapposti (inferiore con bugnato liscio, superiore è liscio e sormontato da un timpano curvo), che si affaccia sulla Laguna Veneziana.

Collegata alla chiesa vi sono una cappella esagonale (Cappella Emiliani, 1528-1543 e restaurata da Jacopo Sansovino nel 1560-1562 per problemi di origine strutturale) e il chiostro del monastero camaldolese.

L'edificio può essere soggetto ad inondazioni da "acqua alta" (es. marea eccezionale nel 2019).



Figura 77. Facciata della chiesa di S. Michele in Isola e della cappella Emiliani (sulla sinistra), vista dalla Laguna Veneziana.

### 8.2.2 Monitoraggio

A febbraio 2023 sono iniziati una serie di monitoraggi periodici per valutare lo stato di conservazione della chiesa in termini di umidità ambientale. Sono state eseguite indagini termografiche, analisi resistive e capacitive mediante sonde termoigrometriche, come indicato in Figura 78.

I principali degradi riscontrati visivamente all'interno dell'edificio sono efflorescenze saline, sfarinatura del mattone, condensa superficiale sul pavimento in marmo, distacco dell'intonaco (ove presente) e qualche infiltrazione di acqua piovana dall'alto (in corrispondenza di cupole o angoli della copertura).

### 8.2.3 Analisi dei risultati

Dal monitoraggio termografico eseguito a luglio 2023 (Tabella 57) non si osservano elevati fenomeni di risalita capillare; il fronte di risalita capillare è poco visibile e le differenze termiche superficiali verticali sono  $< 2^{\circ}\text{C}$ , ad esclusione di una parete (punto n. 3) esposta ad Ovest, in quanto a diretto contatto l'esterno e soggetta a fenomeni di acqua alta lagunari. Tale area presenta comunque un gradiente verticale appena superiore ai  $2^{\circ}\text{C}$ , quindi difficilmente associabile a umidità di risalita. L'alone osservabile nelle termografie è probabilmente correlato al gradiente di temperatura in aria.

Sono ben visibili invece fenomeni di condensa superficiale sulle superfici, correlate alle basse temperature superficiali di pareti e pavimenti e l'elevato contenuto umido in ambiente.

Le efflorescenze saline comparse sulla superficie del mattone dovranno essere eliminate mediante spazzolatura.

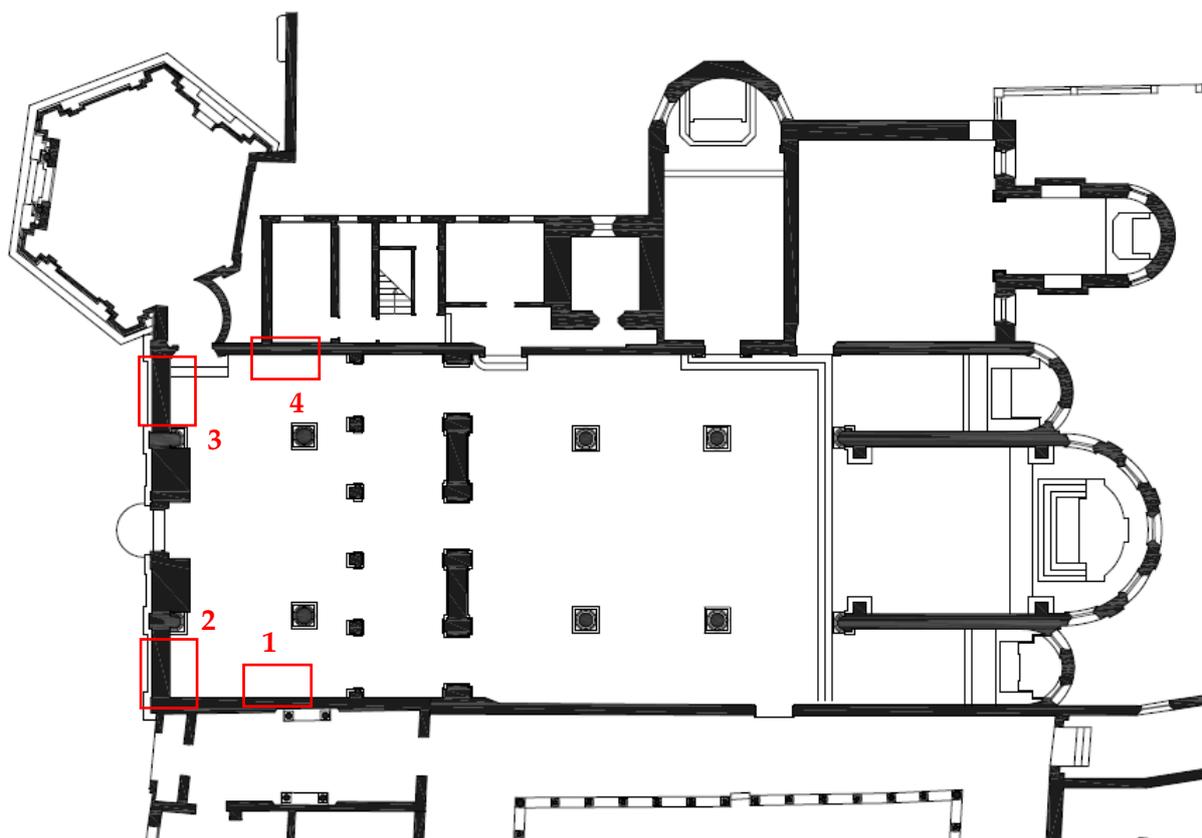


Figura 78. Pianta della chiesa di S. Michele in Isola e indicazione dei monitoraggi eseguiti.

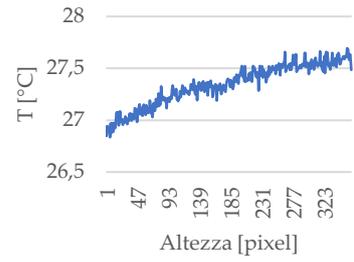
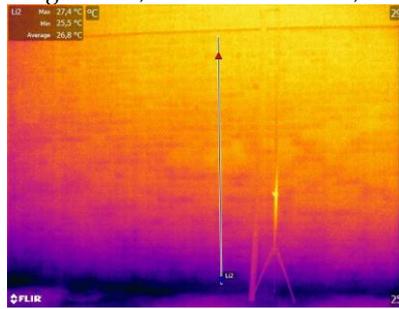
Tabella 56. Temperatura e umidità relativa registrate nei giorni di rilievo termografico.

Data	Temperatura [°C]	Umidità relativa [%]
Giugno 2023	23.20	66.80
Luglio 2023	27.25	71.60
Ottobre 2023	20.90	70.60

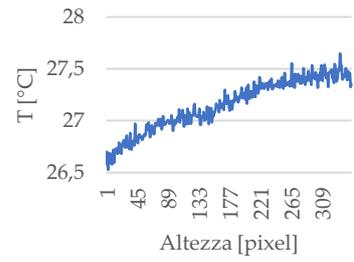
Le analisi superficiali capacitive e resistive hanno registrato elevati livelli di umidità, strettamente correlati alla presenza di efflorescenze saline. La Figura 84 mostra i risultati ottenuti con metodo resistivo: i dati > 40 digit corrispondono ad una struttura umida, situazione che si verifica indipendentemente dall'altezza indagata. Situazione analoga in Figura 85, in cui sono rappresentate le analisi condotte con metodo capacitivo, con contenuto umido corrispondenti a valori > 180 (valore relativo).

Con il passare dei mesi, si nota una leggera diminuzione del contenuto umido superficiale correlato alla resistenza elettrica del materiale indagato.

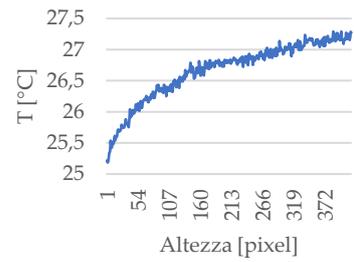
Tabella 57. Immagini fotografiche e termografiche dei vari punti di analisi all'interno della chiesa di S. Michele in Isola (rilievo luglio 2023, T interna = 27.25°C, RH = 71.60%).



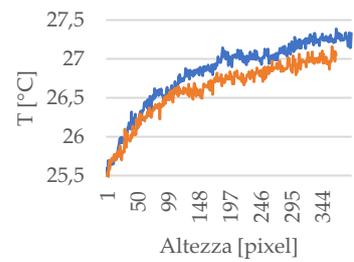
Punto 1 -  $\Delta T = 0.86\text{ °C}$



Punto 2 -  $\Delta T = 1.12\text{ °C}$



Punto 3 -  $\Delta T = 2.11\text{ °C}$



Punto 4 -  $\Delta T = 1.90\text{ °C}$

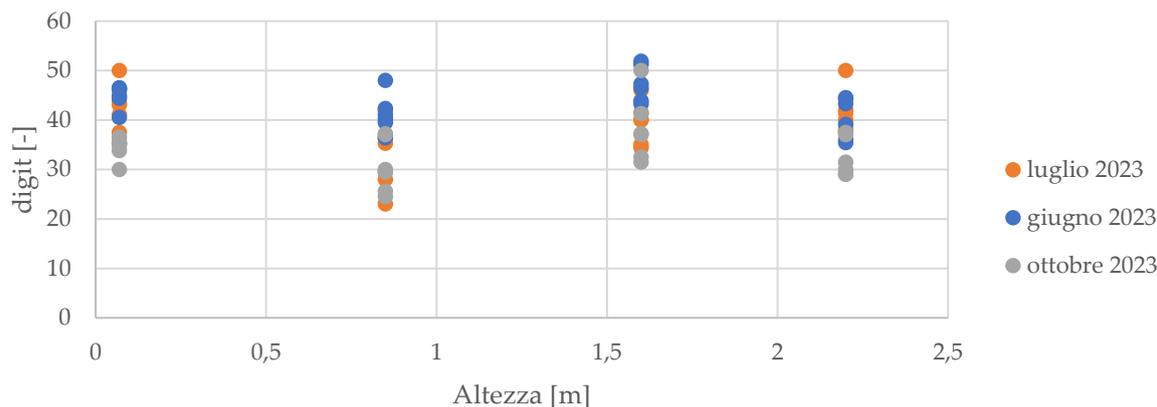


Figura 79. Contenuto di umidità superficiale misurato con metodo resistivo.

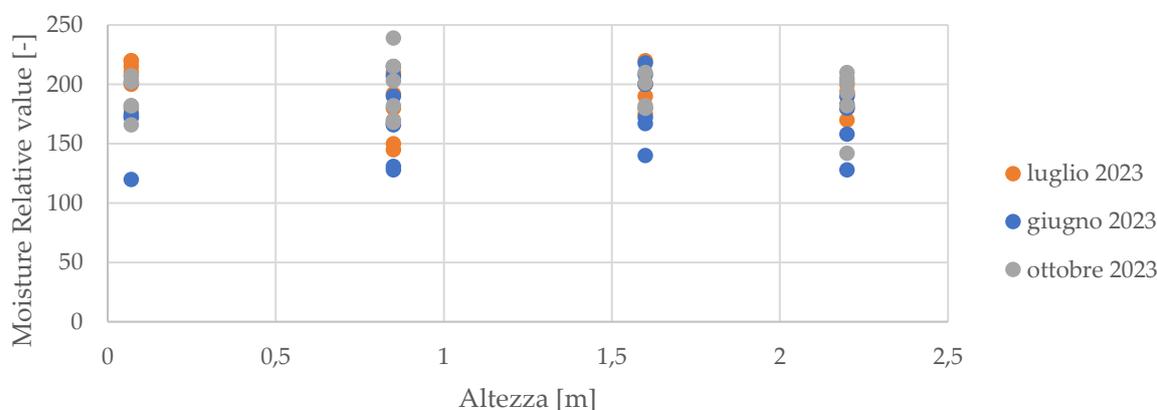


Figura 80. Contenuto di umidità superficiale misurato con metodo capacitivo.

## 8.3 Abbazia di S. Giorgio Maggiore – Isola di S. Giorgio Maggiore, Venezia

### 8.3.1 Informazioni generali

L'abbazia di S. Giorgio Maggiore, sull'omonima isola della Laguna Veneziana, è costituita da un monastero benedettino (XV-XVII secolo) e dalla basilica di Andrea Palladio, completata nel 1610 dall'architetto Scamozzi. Nel 1806 il monastero venne soppresso dalle leggi napoleoniche e trasformato in deposito d'armi, fino al 1951 quando la Fondazione Cini si attivò per la ristrutturazione dell'abbazia.

L'area indagata è la sala del Capitolo, luogo anticamente utilizzato come ritrovo dei monaci per lo svolgimento delle assemblee, e due corridoi di collegamento ad essa, perpendicolari uno all'altro (Figura 82). Esternamente, è stata analizzato anche parte del Chiostro della Buora (Fondazione Cini). Le superfici dell'area di studio appaiono completamente degradate, con distacco dell'intonaco in alcune parti fino a circa 2.00 m di altezza. Tali superfici sono state restaurate con l'utilizzo di varie tecnologie/prodotti negli anni, senza particolari successi.



Figura 81. Abbazia di S. Giorgio Maggiore presso la medesima isola, Venezia.

### 8.3.2 Monitoraggio

A maggio 2023 sono iniziati una serie di monitoraggi periodici per valutare lo stato di conservazione di parte degli ambienti interni dell'abbazia, in termini di umidità ambientale e valutare l'efficacia di un sistema di trattamento passivo per limitare il problema di risalita capillare. La tecnologia applicata è la tipologia (B) descritta al § 0, con raggio d'azione di ~ 5.00 m.

La diagnosi, eseguita prima dell'applicazione del dispositivo e dopo per valutare eventuali variazioni ambientali, ha previsto l'analisi del microclima interno (T-RH), analisi resistive/capacitive superficiali, e variazioni termiche superficiali mediante termocamera IR. Inoltre, la verifica dell'efficacia del sistema prevede di confrontare i risultati delle indagini sia nell'area di influenza del dispositivo che no, con ulteriore confronto tra ambiente interno ed esterno.

I principali degradi visibili ad occhio nudo sono distacco dell'intonaco e sfarinamento del materiale superficiale, sia per quanto riguarda gli ambienti interni che le superfici esterne del chiostro della Buora.



Figura 82. Immagini dello stato di conservazione di parte dell'Abbazia di S. Giorgio Maggiore ((a) e (b) corridoio, (c) distacchi nella muratura interna della Sala Capitolo, (e) applicazione sistema di trattamento passivo) e Chiostro del Buora ((d) muratura intonacata e (f) rimozione degli intonaci – intervento Settembre 2023).

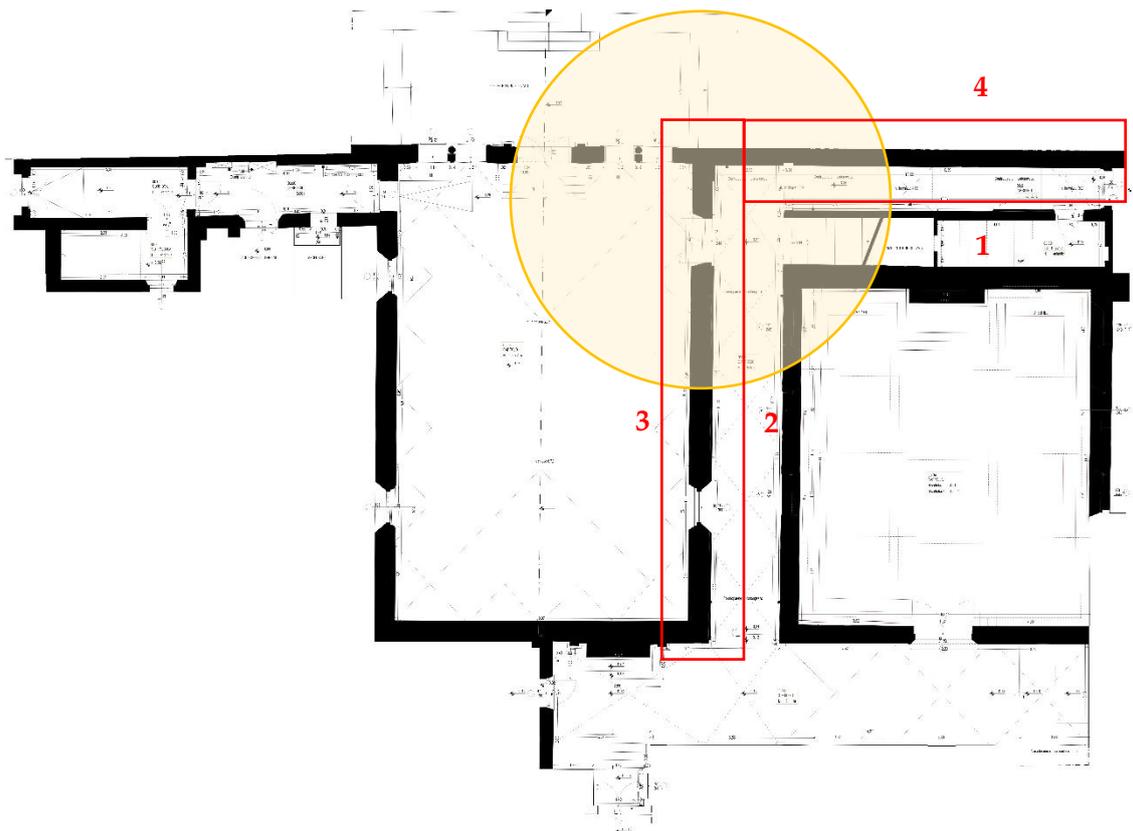


Figura 83. In rosso, punti di analisi presso il monastero di S. Giorgio; in giallo, area di influenza della tecnologia passiva (C).

### 8.3.3 Analisi dei risultati

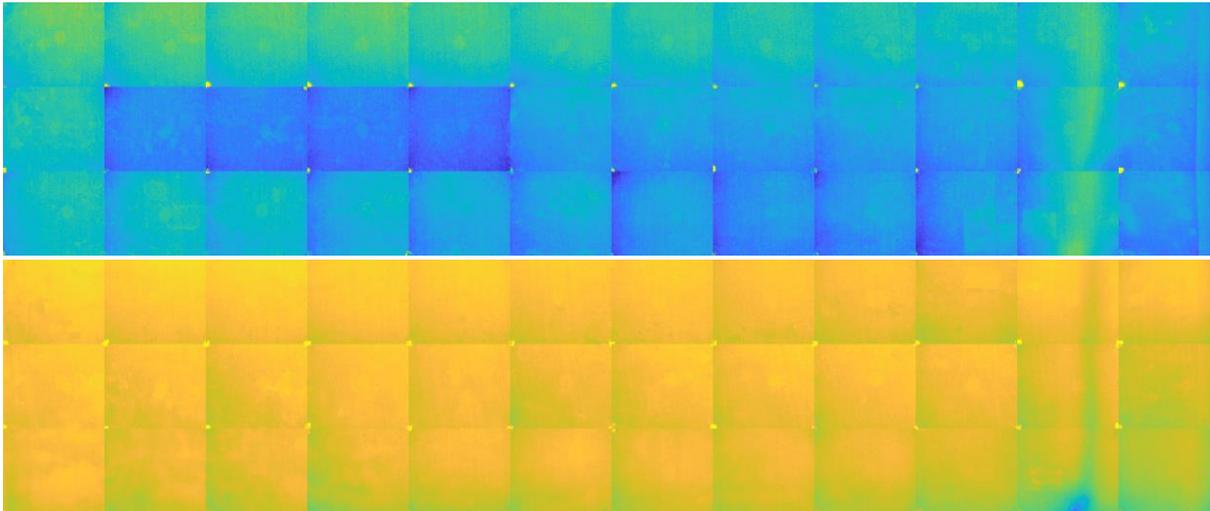
Dal monitoraggio termografico (Tabella 59), in tutte le pareti interne analizzate, non si osserva alcun tipo di fenomeno correlato alla risalita capillare; infatti, le differenze termiche superficiali verticali sono  $< 2^{\circ}\text{C}$ , quindi non associabili a umidità di risalita. Nelle varie zone indagate si sono osservate delle variazioni superficiali dovute a distacchi dell'intonaco, corrispondenti ad aree a temperatura inferiore nelle immagini termiche. I distacchi dell'intonaco, con conseguente sfarinatura dello stesso, si presentano alla base della muratura fino ad un'altezza di 100-150 cm nella sala capitolo, mentre nei corridoi interni dell'abbazia e nel chiostro esterno fino a circa 200-250 cm di altezza.

Tabella 58. Temperatura e umidità relativa registrate nei giorni di rilievo termografico.

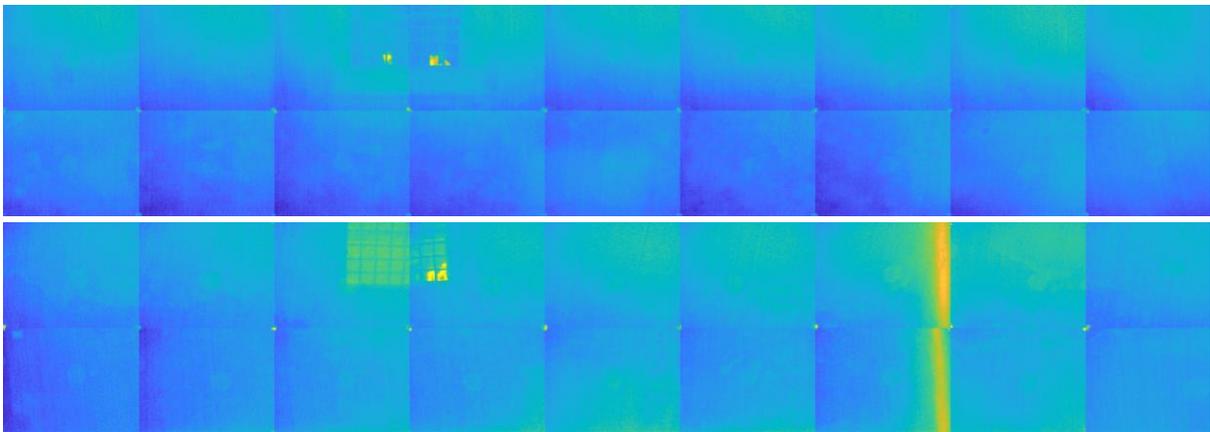
Data	Temperatura [ $^{\circ}\text{C}$ ]	Umidità relativa [%]
Maggio 2023	19.07	64.22
Giugno 2023	24.60	64.40
Ottobre 2023	26.20	60.95

Tabella 59. Immagini fotografiche e termografiche dei vari punti di analisi all'interno del Tesoro Grande.

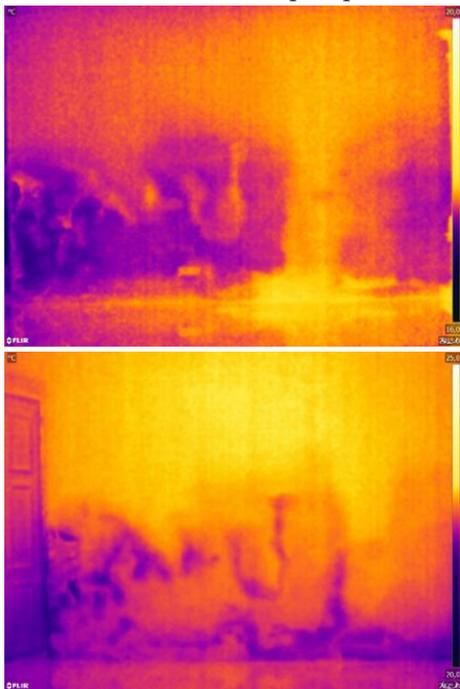
**Area 1** (fonte: CNR-ITC) – sopra: pre-trattamento, sotto: post-trattamento (5 mesi)



**Area 2** (fonte: CNR-ITC) – sopra: pre-trattamento, sotto: post-trattamento (5 mesi)



**Area 3** – sopra: pre-trattamento, sotto: post-trattamento (5 mesi)



Le analisi superficiali capacitive e resistive hanno registrato elevati livelli di umidità, correlati anche alla presenza di efflorescenze saline. In entrambe le zone, trattata e no, si osserva un contenuto umido superficiale elevato, senza diminuzioni nel tempo, anche dopo l'applicazione del sistema di trattamento dopo circa cinque mesi. Sia nelle aree interne che esterne si verifica al contrario un leggero aumento di umidità. La Figura 84 mostra i risultati ottenuti con metodo resistivo: i dati > 40 digit corrispondono ad una struttura umida, situazione che si presenta maggiormente ad altezze inferiori (100-150 cm), ma con casi di elevato grado umido anche ad altezze elevate. Situazione analoga in Figura 85, in cui sono rappresentate le analisi condotte con metodo capacitivo.

Non è possibile in questo caso verificare l'efficacia del sistema di trattamento, in quanto, i livelli di umidità registrati con i vari metodi di monitoraggio risultavano molto bassi già al primo sopralluogo. Ulteriore verifica è stata effettuata mediante pesatura del contenuto umido dell'intonaco del corridoio interno e del chiostro esterno, mediante pesatura in forno del materiale pre e post essiccazione in forno a 105°C: la variazione del contenuto umido risulta pari al  $3.2 \pm 1\%$  all'esterno (chiostro) e al  $4.22\%$  all'interno (corridoio), approssimabile ad umidità fisiologica del materiale (3-5% in peso).

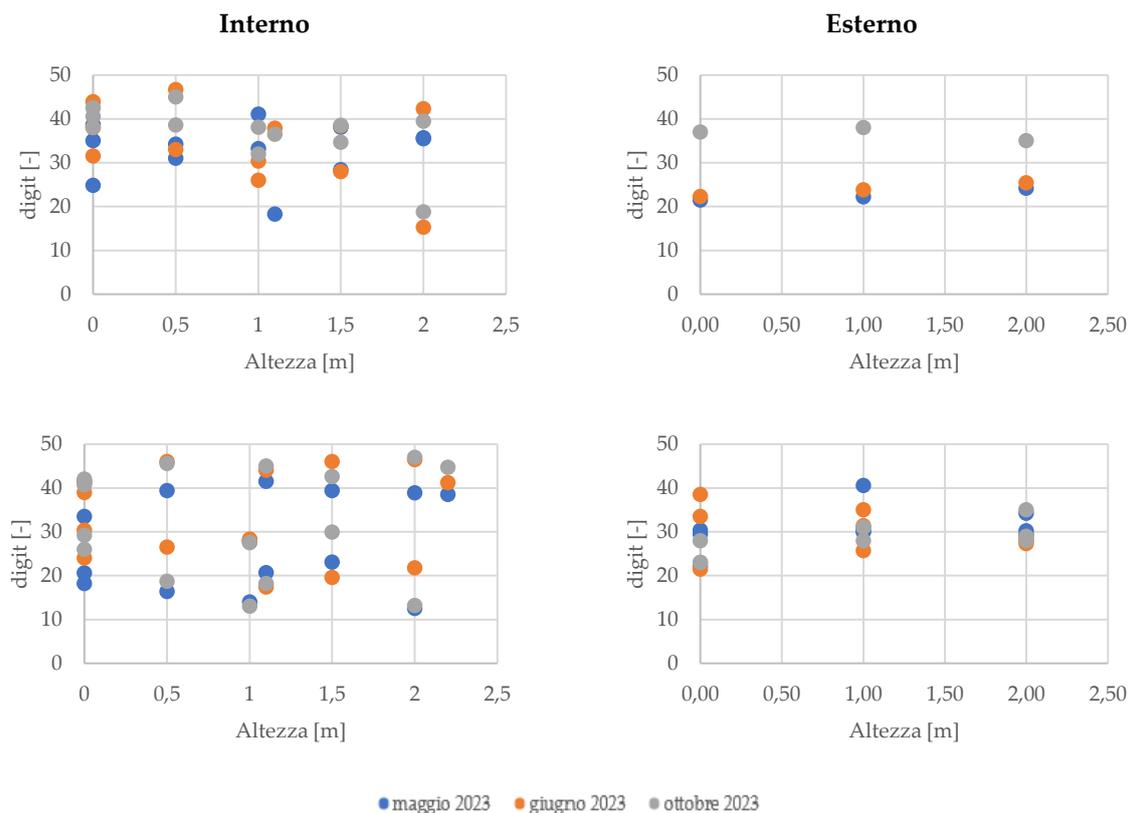


Figura 84. Contenuto di umidità superficiale nelle aree trattate (sopra) e no (sotto), con metodo resistivo.

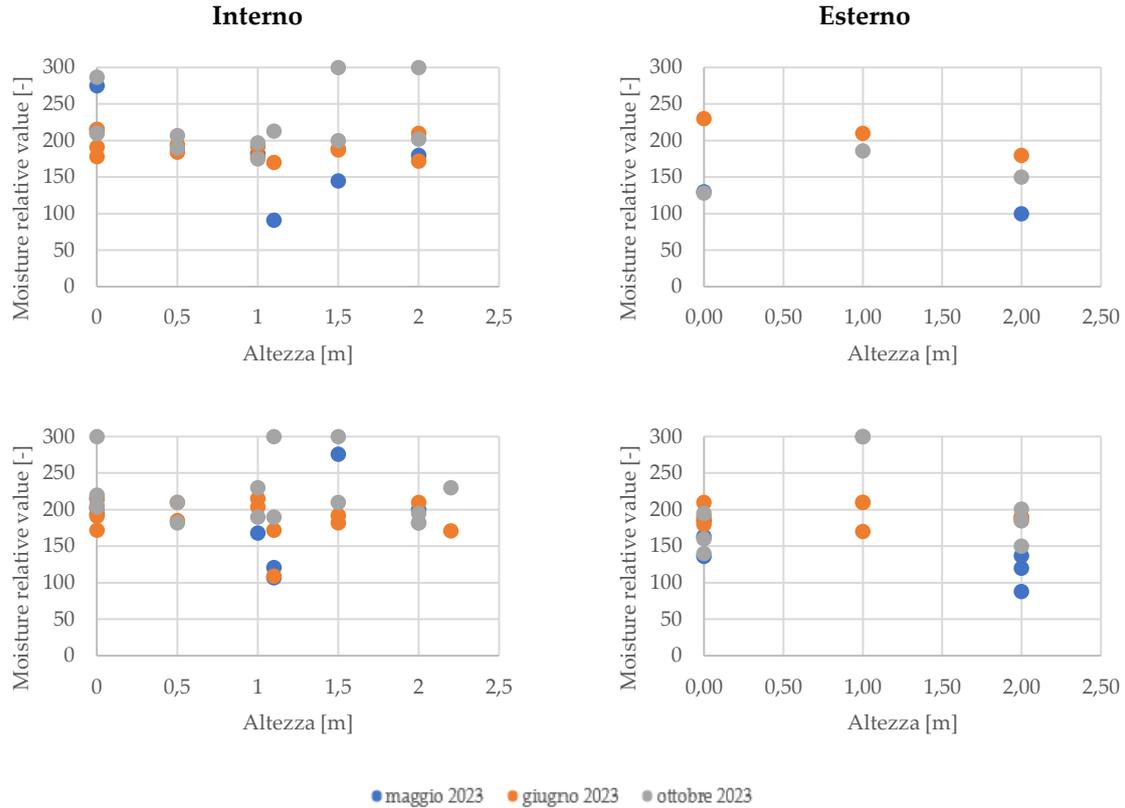


Figura 85. Contenuto di umidità superficiale nelle aree trattate (sopra) e no (sotto), con metodo capacitivo.

## 8.4 Discussione

La presentazione dei casi studio sopra riportati ha lo scopo di indicare quali monitoraggi possono essere eseguiti nel costruito veneziano (e non), secondo le prove precedentemente elaborate in laboratorio e verificare l'efficacia di alcuni dei sistemi di intervento presenti in commercio.

Tali tecnologie di "trattamento" del fenomeno dell'umidità da risalita capillare, completamente non invasive in quanto non alterano in alcun modo l'immobile né dal punto di vista estetico né costruttivo, promettono di risolvere il problema di umidità ascendente dal terreno mediante l'emissione di onde elettromagnetiche opportunamente modulate, interrompendo il fenomeno alla base della muratura. I risultati attuali, analizzati mediante monitoraggi termografici, sembrano mostrare l'efficacia delle tecniche, che richiedono però un approfondimento scientifico con ulteriori analisi di tipo invasivo e sperimentazioni in laboratorio, in regime controllato.

Fondamentale è avere una buona conoscenza del manufatto su cui è necessario intervenire, eseguendo sopralluoghi e diagnosi relativamente il microclima, la tecnologia costruttiva e lo stato di conservazione. Il monitoraggio potrà poi continuare nel tempo, per verificare l'effettiva efficacia del sistema di trattamento applicato e la conservazione dei miglioramenti nel tempo.

## 9. Simulazione dinamica igrometrica

*L'attenzione al risparmio energetico, da anni al centro dell'attenzione delle istituzioni per la redazione di legislazioni e norme, considera le prestazioni termiche dell'intero edificio e del singolo componente costruttivo che lo definisce. In tali regolamentazioni si è ritenuta di fondamentale importanza l'analisi della condensa interstiziale e la presenza di muffa nei componenti edilizi, dapprima con metodo statico e successivamente dinamico. La presenza di umidità in tutte le sue forme, infatti, insediata nell'involucro e negli ambienti interni, può compromettere l'efficacia e i benefici ottenibili dal punto di vista dei consumi energetici e del comfort.*

*In questo capitolo si è affrontato il tema eseguendo delle simulazioni igrometriche in regime dinamico per valutare la vulnerabilità e il comportamento nelle pareti degli edifici, tenendo in considerazione la quantità di acqua che si può accumulare in esse se sottoposte a risalita capillare. È quindi stato sviluppato un modello fenomenologico che descrive il trasferimento di umidità, la cinetica della risalita capillare ed il fenomeno di evaporazione. Tale analisi ha previsto la correlazione tra i diversi materiali edilizi già utilizzati nelle sperimentazioni in laboratorio, per valutarne il singolo comportamento e la connessione tra gli stessi.*

*Nel settore edile, la riproduzione del fenomeno mediante simulazione è utile per prevedere la condizioni dell'involucro a medio-lungo termine e quindi proporre delle metodologie di diagnosi e conservazione del patrimonio edilizio, progettando una pianificazione sostenibile di mantenimento e restauro di beni architettonici, dal punto di vista di efficacia e compatibilità di materiali e tecnologie.*

## 9.1 Modelli numerici del trasporto di umidità

Le simulazioni in regime dinamico [5] offrono un supporto alle verifiche stazionarie di umidità nell'involucro edilizio effettuate con il metodo di Glaser (es. verifica condensa interstiziale, § 1.1.2). È possibile valutare simultaneamente una serie di meccanismi di trasporto di calore e umidità in regime variabile (Tabella 60), le condizioni al contorno e il comportamento dell'utenza.

I materiali igroscopici [159] in contatto con acqua liquida, possono assorbirla all'interno dei pori fino a quando il sistema non raggiunge uno specifico contenuto di umidità di equilibrio (saturazione libera  $w$ ), corrispondente all'umidità relativa nell'aria (RH = 100%). Oltre questo livello, il materiale considerato raggiunge la regione di super-saturazione ( $w_{max}$ ), con RH > 100%. Il livello di saturazione libera è però sempre inferiore al contenuto massimo, in quanto si trovano delle interfacce tra pori e acqua che danno origine a delle bolle d'aria.

Tabella 60. Elenco dei meccanismi di trasporto di calore, vapore e acqua negli edifici [160].

Trasporto	Meccanismo	Causa/potenziale di trasporto
Calore	Conduzione termica	Temperatura
	Radiazione termica	Temperatura alla quarta potenza
	Flusso d'aria	Pressione totale, gradiente di densità
	Flusso entalpico mediante trasporto di umidità	Diffusione di vapore e trasporto liquido con transizione di fase
Vapore	Diffusione di vapore	Pressione di vapore
	Trasporto molecolare	
	Diffusione di soluzione	
Acqua	Convezione	Gradiente di pressione totale
	Conduzione capillare	Suzione capillare
	Diffusione superficiale	Umidità relativa
	Infiltrazione	Gravità
	Flusso idraulico	Gradiente di pressione
	Elettrosmosi/elettrocinesi	Campo elettrico
	Osmosi	Concentrazione ionica

Il trasporto di umidità in questi materiali si distingue in due componenti: trasporto di vapore e trasporto capillare liquido. Il primo avviene sulla superficie dei pori o dentro i capillari, il secondo all'interno dei pori più grandi di un determinato materiale. Nell'assorbimento, descritto nella fisica tecnica come fenomeno di diffusione, si può osservare una proporzionalità diretta tra la quantità di liquido assorbito e la radice quadrata del tempo.

$$g_w = -D_w(w) \cdot \text{grad } w \quad (31)$$

Dove:

$g_w$  è la densità di flusso di trasporto del liquido [kg/m<sup>2</sup>s],  $D_w$  il coefficiente di trasporto liquido [m<sup>2</sup>/s] e  $w$  il contenuto umido [kg/m<sup>3</sup>].

$D_w$  è fortemente dipendente da  $w$ , ma anche dal tipo di materiale e dalle condizioni ambientali al contorno. Vengono a sua volta identificate due tipologie di coefficienti per il trasporto

liquido: il coefficiente di trasporto liquido per suzione  $D_{ws}$ , che descrive l'assorbimento capillare di acqua quando la superficie imbibente è completamente bagnata (equazione 32), e il coefficiente di trasporto liquido per diffusione  $D_{ww}$ , che descrive la diffusione di acqua liquida quando l'imbibizione nel materiale è completa e nuova acqua non è più assorbita (livello di igroscopicità massima), quindi l'acqua all'interno inizia a diffondersi nella struttura attraverso i capillari più piccoli.

$$D_{ws}(w) = 3.8 \cdot A/w_f^2 \cdot 1000^{(w/w_f)-1} \quad (32)$$

Dove:

$A$  è il coefficiente di assorbimento d'acqua [kg/m<sup>2</sup>s],  $w_f$  l'acqua di saturazione libera [kg/m<sup>3</sup>] e  $w$  il contenuto umido [kg/m<sup>3</sup>].

Poiché nei pori la diffusione del vapore acqueo è ostacolata dalla riduzione della sezione trasversale, dagli effetti di adsorbimento e dalla tortuosità della struttura, si determina il fattore di resistenza alla diffusione di acqua  $\mu$ , che rappresenta il rapporto tra il coefficiente di diffusione del vapore in aria e il vapore acqueo nei materiali da costruzione

Al termine del processo di suzione e diffusione inizia la fase di asciugatura, che si può descrivere mediante la seguente equazione:

$$\frac{dX}{dt} = -\frac{1}{t_d}(X - X_e) \quad (33)$$

Dove:

$dX/dt$  rappresenta il tasso di asciugatura,  $X$  [kg/(kg db)] è il contenuto di umidità del materiale nel tempo  $t$  [h],  $t_d$  è la costante del tempo di asciugatura [h],  $X_e$  è il contenuto di umidità del materiale in equilibrio [kg/(kg db)].

La costante del tempo di asciugatura  $t_d$  dipende dalle condizioni dell'aria e dalle caratteristiche del materiale investigato. Per descrivere tale parametro sono stati proposti vari modelli empirici o semi-teorici, ed uno di questi considera la velocità dell'aria  $v$  [m/s], la temperatura  $T$  [K] e l'attività dell'acqua  $a_w$ :

$$t_d = c_0 T^{c_1} a_w^{c_2} v^{c_3} \quad (34)$$

Dove:

$c_1, c_2, c_3$  sono costanti empiriche regolabili.

## 9.2 Software di simulazione dinamica igrometrica WUFI 2D

Il software di simulazione WUFI® 2D [161] – sviluppato dal Fraunhofer Institute for Building Physics – permette di eseguire un calcolo realistico del trasporto di calore e di umidità in strutture bidimensionali, definendo le caratteristiche dei materiali e le condizioni climatiche al contorno, per una corretta lettura del contenuto d'acqua e dei profili di umidità.

Il modello di trasporto di calore e umidità adottato dal software e sviluppato da Künzle [162] è basato sul metodo ai volumi finiti: l'umidità relativa  $RH$  è l'unica modalità di trasferimento dell'umidità, invece del contenuto umido  $w$  o della pressione di suzione  $P$ . Il sistema di

equazioni (35) descrive tale modello e l'impatto che le proprietà dei materiali hanno: la prima equazione indica il trasferimento di energia [J/m<sup>3</sup>K] mentre la seconda il trasferimento di umidità [kg/m<sup>3</sup>].

$$\begin{cases} \frac{\partial h}{\partial T} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + h_v \nabla \cdot [\rho_0 \delta_p \nabla (RH p_s)] \\ \frac{\partial w}{\partial RH} \cdot \frac{\partial RH}{\partial t} = \nabla \cdot [D_{RH} \nabla_{RH} + \delta_p \nabla (RH p_s)] \end{cases} \quad (35)$$

Dove:

$h$  è l'entalpia dell'acqua [J/m<sup>3</sup>],  $T$  la temperatura assoluta [K],  $t$  il tempo [s],  $\lambda$  la conducibilità termica [W/(mK)],  $h_v$  il calore latente di evaporazione del vapor d'acqua [J/kg],  $\rho_0$  la densità del materiale asciutto [kg/m<sup>3</sup>],  $\delta_p$  la permeabilità al vapore [kg/(m s Pa)],  $RH$  è l'umidità relativa [-] e  $w$  il contenuto umido [kg/m<sup>3</sup>].

Il software permette di analizzare la condensa interstiziale, l'influenza dell'irraggiamento solare e della pioggia battente, la migrazione del vapore, l'umidità nei materiali, l'assorbimento capillare, la condensa estiva, l'inerzia termica e gli effetti del contenuto d'acqua sulla conduttività termica, fenomeni correlati anche all'asciugatura della struttura stessa [163], [164]. Non considera però gli effetti che possono provocare i Sali igroscopici e le proprietà materiche dipendenti dal tempo (es. ritiri, rigonfiamenti).

L'impostazione del lavoro definita dal software segue alcuni step:

- Geometria – specifica del componente edilizio mediante editor di componenti grafici (elementi rettangolari), mediante l'utilizzo di una griglia numerica;
- Materiali – materiali che costituiscono il componente edilizio e i loro parametri termo-igrometrici (Tabella 61);
- Condizioni iniziali – T/RH nei componenti all'inizio della simulazione (per un edificio di tipo residenziale in Europa centrale vengono fissate pari a 20°C e RH 40% in inverno, 22°C e RH 60% in estate [1]);
- Condizioni al contorno (superficie/clima) – coefficienti di superficie e condizioni climatiche al contorno ai diversi segmenti del componente edilizio (T [°C], RH [%] e velocità dell'aria  $v$  [m/s]);
- Durata della simulazione – numero di passi temporali.

Al termine della simulazione gli output editabili sono temperatura [°C], umidità relativa [%] e contenuto totale d'acqua [kg/m<sup>3</sup>], la cui accuratezza dipende dalla griglia numerica scelta nella geometria, dal numero di timestep e dai criteri di convergenza scelti.

Tabella 61. Principali caratteristiche materiali (input WUFI 2D) [159].

Parametro	Simbolo	U.M.	Definizione
Densità apparente	$\rho_s$	kg/m <sup>3</sup>	Per i materiali porosi, definita come il rapporto tra la massa del materiale ed il suo volume
Porosità	$\varphi$	%	Porzione di volume occupata dai pori rispetto al volume totale dei materiali
Capacità termica specifica	$c$	J/kgK	Quantità di calore necessaria affinché un materiale di massa 1 Kg aumenti la sua temperatura di 1 K
Conducibilità termica	$\lambda$	W/mK	Attitudine di un materiale a trasmettere il calore
Coeff. di assorbimento d'acqua	$A$	kg/m <sup>2</sup> √s	Aumento di massa dovuto all'assorbimento capillare di acqua in un intervallo di tempo determinato
Resistenza alla diffusione del vapore	$\mu$	-	Resistenza del materiale al passaggio di vapore rispetto ad uno strato di aria fermo dello stesso spessore

### 9.2.1 Metodo

Basandosi sui modelli numerici sviluppati dal software, la simulazione ha lo scopo di analizzare il comportamento dei differenti materiali o strutture in relazione alla risalita capillare. In particolare, considerando le tecnologie costruttive e i materiali utilizzati negli edifici Veneziani, come murature “faccia a vista” o intonacate. Si procede quindi investigando e confrontando tra loro delle murature in ambiente reale con i modelli in muratura ricostruiti in laboratorio (§ 7.3), considerando quindi differenti composizioni costruttive ed esposizione. Tale scelta è stata effettuata per valutare se esistono variazioni tra l'ambiente reale, in cui gli edifici sono costantemente soggetti a fenomeni atmosferici (variazioni T/RH, vento, precipitazioni, maree, nonché inquinamento ambientale), e lo studio del fenomeno in ambiente controllato, in cui le variazioni delle condizioni al contorno sono limitate.

#### 9.2.1.1 Geometria, materiali e condizioni iniziali

Le murature simulate sono composte con i medesimi materiali analizzati in laboratorio: mattoni rossi di argilla cotta (industriali – RB, di recupero – HB), malta di calce (premiscelata – GLM, tradizionale – HLM) e intonaco (calce-sabbia – LP, Marmorino – MP e Cocciopesto – CP). Le caratteristiche fisiche dei materiali sono presentate in Tabella 62.

Ulteriori valutazioni hanno previsto la variazione della struttura dal punto di vista tecnologico e delle dimensioni, variando lo spessore della muratura a una testa (12.5 cm) e tre teste (~ 40 cm).

Per la riproduzione del movimento di risalita capillare dell'acqua dalla base (terreno lagunare Veneziano e test di laboratorio), le strutture sono state posizionate sopra uno strato di terra con elevata porosità e contenuto d'acqua (~500 kg/m<sup>3</sup>).

La geometria iniziale è stata suddivisa in una griglia numerica di 22 x 38 elementi per il calcolo bidimensionale del contenuto di umidità nella muratura.

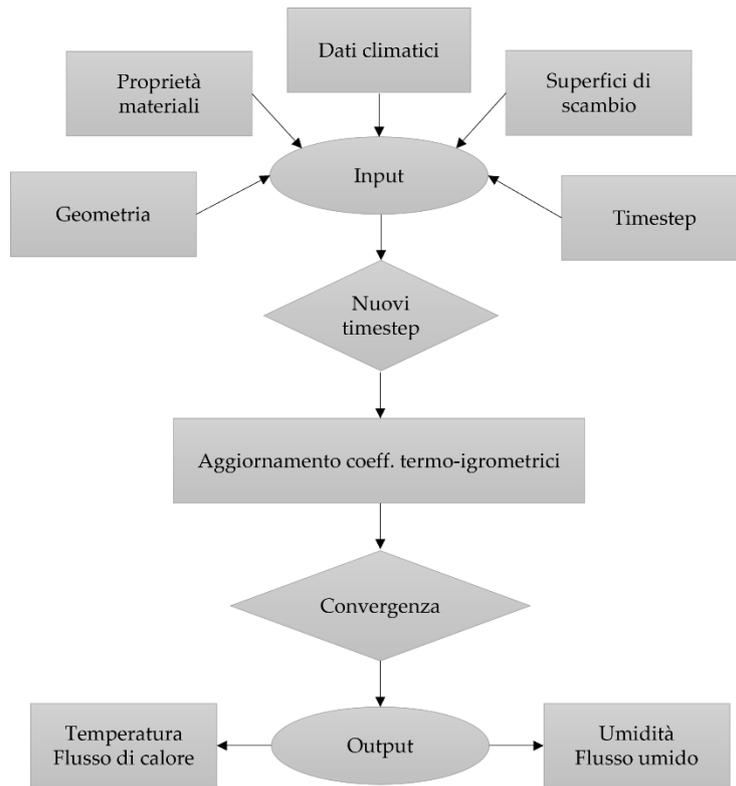


Figura 86. Diagramma di flusso per la simulazione in WUFI.

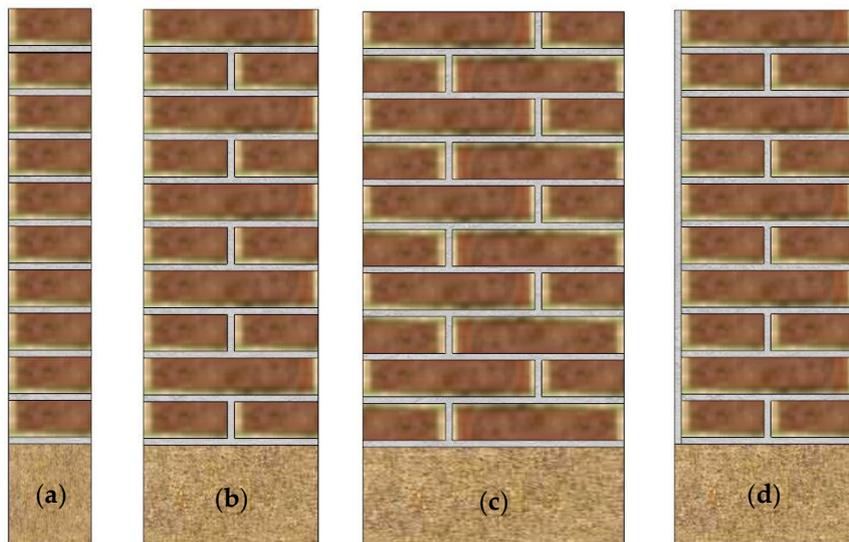


Figura 87. Modelli di muratura simulate in WUFI 2D: (a) una testa faccia a vista, (b) due teste faccia a vista, (c) tre teste faccia a vista, (d) due teste intonacata.

Tabella 62. Parametri termo-igrometrici materiali da costruzione utilizzati nella simulazione (dati provenienti da caratterizzazione in laboratorio).

Materiali	$\rho_s$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\varphi$ [%]	$c$ [J/kgK]	$\lambda$ [W/mK]	$\mu$ [-]
RB	1581	37	850	0.345	5.91
HB	1577	26	850	0.549	5.91
GLM	1980	26	850	0.774	4.23
HLM / LP	1985	28	850	0.812	2.47
CP	1660	39	850	0.601	2.65
MP	1837	33	850	0.936	4.04

I materiali sopra elencati sono stati analizzati secondo differenti combinazioni, così come i modelli di muratura realizzati in laboratorio nella tipologia a due teste (Tabella 63); nella tecnologia a una e tre teste i materiali utilizzati sono stati RB e GLM.

Il contenuto d'acqua medio in equilibrio all'inizio nella simulazione varia in base alle condizioni iniziali definite: per  $T = 15-20^\circ\text{C}$  e  $\text{RH} = 50-90\%$  (Tabella 64). Le condizioni a  $15^\circ\text{C}$  e  $\text{RH} 90\%$  hanno lo scopo di estremizzare le condizioni al contorno, per valutare quanto possano influenzare o meno la variazione del contenuto d'acqua nella struttura.

Tabella 63. Combinazione di materiali utilizzate nelle simulazioni igrometriche.

RB	HB	GLM	HLM	LP	CP	MP
X		X				
X			X			
	X		X			
X		X		X		
X		X			X	
X		X				X

Tabella 64. Contenuto d'acqua [kg/m<sup>3</sup>] iniziale nei materiali da costruzione utilizzati nella simulazione.

Materiali	15°C – 90%	20°C – 50%
RB / HB	~ 20.00	~ 2.34
GLM / HLM / LP	~ 77.65	~ 10.57
CP / MP	~ 23.88	~ 10.00

### 9.2.1.2 Condizioni al contorno (superficie/clima)

Le condizioni ambientali che vengono considerate nella simulazione sono (i)  $T$  aria interna/esterna, (ii)  $\text{RH}$  interna/esterna, (iii) radiazione solare globale/diffusa, (iv) radiazione termica dal cielo, (v) precipitazioni e (vi) direzione e velocità del vento.

Per le condizioni ambientali esterne (Venezia, zona climatica E) si utilizzano dati statistici [165] che indicano un anno tipico per la città considerata ("anno tipo") [166]. Le condizioni ambientali interne sono quelle del laboratorio in cui è stata effettuata la sperimentazione ( $T = 21.6 \pm 2.3^\circ\text{C}$ ,  $\text{RH} = 54 \pm 6\%$ ); il file meteo creato è basato sulla normativa EN 13788 [4], mediante dati registrati data logger (§ 7.4.1.1). Il periodo di calcolo dell'intera simulazione è di un anno (Figura 88).

I coefficienti di scambio termico adottati nelle simulazioni sono di 25 W/m<sup>2</sup>K per le superfici esterne e 7.7 W/m<sup>2</sup>K per le superfici interne, come da normativa UNI EN ISO 6946 [167].

Il valore di permeabilità  $S_d$  è adottato solo nel caso di struttura rivestita con intonaco, definendo il valore da caratterizzazione in laboratorio: intonaco di calce-sabbia 0.05 m, intonaco di Cocciopesto 0.06, intonaco di Marmorino 0.09 m.

Il coefficiente di assorbimento a onde corte determina la frazione della radiazione solare incidente assorbita dalla parete; il valore varia in base alla colorazione superficiale del materiale: per intonaci di colore chiaro 0.4 (calce-sabbia / marmorino), di colore scuro 0.6 (cocciopesto / mattone).

Il coefficiente di frazione di pioggia (0-1) aderente viene utilizzato solamente nel caso di analisi della muratura in ambiente esterno (es. Venezia), ossia in riferimento alla quantità di pioggia che colpisce effettivamente la superficie. Se il valore è 0 l'assorbimento sarà nullo, se 1 è totale (come nel caso di una copertura piana); per elementi verticali come nel caso in esame si utilizza 0.7.

Le variabili come radiazione solare e precipitazioni, in alcune analisi sono state escluse per valutare l'influenza che hanno o meno sul processo di evaporazione superficiale e quindi asciugatura della muratura.

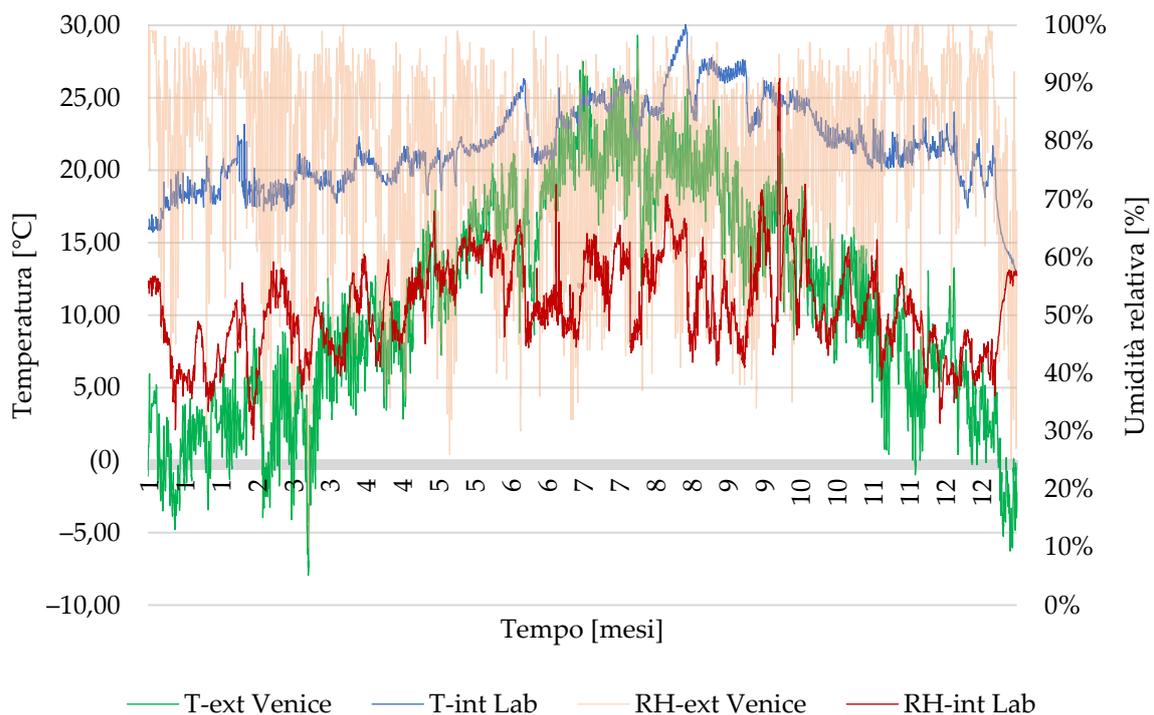


Figura 88. Condizioni climatiche interne (laboratorio FisTec) ed esterne (Venezia).

### 9.3 Risultati

I risultati sui modelli di laboratorio ottenuti dai vari monitoraggi (§ 7.4) è possibile confrontare e calibrare gli output delle simulazioni.

I risultati simulati mediante software mostrano come la risalita sia molto rapida nei primi 10-20 giorni di imbibizione in tutte le strutture indagate (con leggere variazioni tra le stesse), raggiungendo il massimo contenuto d'acqua registrato. Dopo circa un mese il contenuto d'acqua è ancora elevato, e successivamente inizia a diminuire, proporzionalmente alla velocità di suzione. Tra il secondo e il quarto mese di imbibizione, la struttura raggiunge indicativamente una fase di stabilizzazione, con variazioni del contenuto d'acqua di circa 5 kg/m<sup>3</sup>, in base alle condizioni al contorno a cui è sottoposta la struttura indagata o i materiali costitutivi (Figura 89). Una situazione molto simile è stata riscontrata in laboratorio (§ 7.4.2.5.2).

I risultati di seguito riportati fanno riferimento alle condizioni iniziali standard di T = 20°C e RH = 50%, e nelle condizioni controllate del laboratorio.

In Figura 90 sono riportati i risultati relativamente l'altezza di risalita capillare osservata nei modelli simulati con spessore due teste nei primi 20 giorni di imbibizione, in cui si osservano delle differenze di comportamento tra la muratura "a vista" e quella intonacata. Le combinazioni RB+GLM o RB+HLM mostrano un livello medio di risalita superficiale di ~ 19 cm di altezza, mentre HB+HLM ~ 38 cm. Queste differenze si notano però tra le murature con materiali industriali (RB e GLM) e murature con materiali tradizionali (HB e HLM): il secondo campione mostra un flusso capillare più lento, principalmente correlato alla porosità dei mattoni inferiore, ma continuo, infatti il fronte raggiunge un'altezza elevata.

Le murature intonacate raggiungono un fronte di ~ 30 cm, con valori più elevati registrati in LP e CP. Questi risultati valutano la grande influenza che la porosità dei vari materiali ha sulla struttura totale: tra gli intonaci, CP (con il valore di porosità maggiore) registra il valore più elevato di risalita nei primi giorni, facilitando l'assorbimento d'acqua capillare. Una volta raggiunto il livello massimo, inizierà ad agire l'evaporazione superficiale che provocherà l'espulsione del contenuto d'acqua, soprattutto in materiali come questo in cui l'elevata porosità (determinata dalla composizione stessa del materiale) definisce dapprima una rapida imbibizione e in seguito una rapida evaporazione. Le malte, che già fungono da interfaccia tra i mattoni limitandone la suzione, avendo porosità più bassa rallentano ulteriormente il fenomeno in quanti i pori al loro interno risultano più tortuosi e di dimensioni inferiori.

Infine, valutando le murature a vista con spessore una e tre teste, i cui valori sono rispettivamente di ~ 30 cm e ~ 44 cm, si individua la diretta proporzionalità con lo spessore: ovvero, più la muratura è spessa, più il contenuto d'acqua all'interno aumenterà con conseguente aumento del fronte superficiale.

La velocità di risalita decresce lentamente dopo il quarto giorno di imbibizione, partendo da un valore medio di 0.80 cm/h nelle murature a due teste (intonacate e non), 0.35 cm/h nella muratura a una testa e 0.65 cm/h nella muratura a tre teste, ed arrivando ad un valore di 0.02-0.09 cm/h al ventesimo giorno. Il grafico in Figura 91 mostra come in tutti i modelli la velocità di risalita abbia la medesima tendenza, ossia elevata fino al terzo giorno e poi si stabilizza, nonostante la risalita sul fronte e il contenuto d'acqua all'interno della struttura continui lentamente ad aumentare.

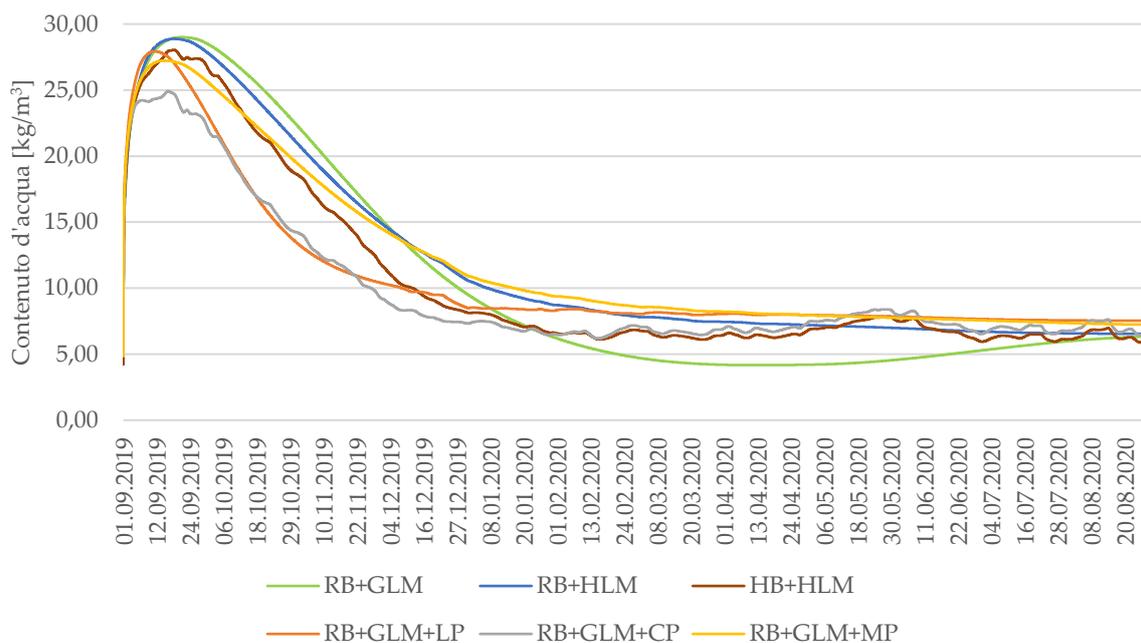


Figura 89. Variazione del contenuto d'acqua nel tempo (periodo di analisi 1 anno) nei modelli di muratura indagata in laboratorio (condizioni iniziali  $T = 20^{\circ}\text{C}$ ,  $\text{RH} = 50\%$ ).

Analizzando il flusso capillare (Figura 92) è possibile osservare come in (a) la muratura “a vista” mostri un menisco convesso, e in (b) la muratura intonacata un menisco concavo. Tali differenze sono correlate alla elevata porosità degli intonaci come indicato precedentemente; inoltre, vista la continuità del materiale superficiale senza alcun tipo di interfaccia, semplifica la risalita fungendo da elemento di “ponte” tra i materiali nel substrato (§ 7.3.2) [24]. La suzione dipende inoltre dalle caratteristiche intrinseche del materiale considerato: le malte premiscelate contengono additivi idrorepellenti o cementizi che riducono le proprietà di assorbimento rispetto a malte/intonaci realizzati con ricetta tradizionale.

La valutazione del contenuto d'acqua totale  $[\text{kg}/\text{m}^3]$  nelle differenti strutture viene indagato dopo 10 giorni, un mese e infine dopo un anno di imbibizione. Il valore del contenuto d'acqua  $WC [\text{kg}/\text{m}^3]$ , espresso dal software WUFI è dato dall'equazione (36):

$$WC = \frac{m_w}{V_c} \quad (36)$$

Dove:

$m_w$  è la massa d'acqua nel componente indagato  $[\text{kg}]$ ,  $V_c$  è il volume del componente  $[\text{m}^3]$ .

È facilmente individuabile come  $WC$  varia nei materiali indagati; infatti, nella malta e nell'intonaco si registra circa un 90% del contenuto d'acqua totale (equamente distribuito tra i due componenti), e solamente il restante 10% nel mattone. Tale osservazione è correlata alla struttura porosa e capillare che caratterizza il conglomerato, ossia un diametro dei pori ridotto, con conseguente tendenza a trattenere maggiormente l'umidità al suo interno.

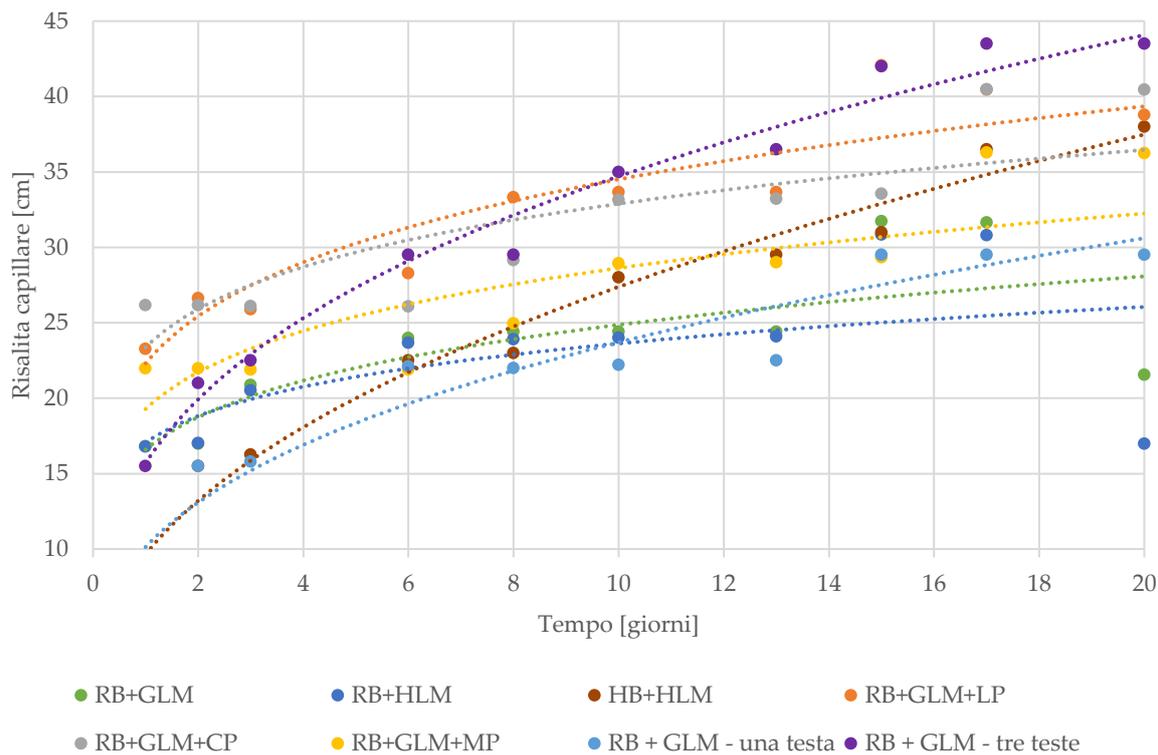


Figura 90. Variazioni del livello di risalita capillare nel tempo durante i test in laboratorio.

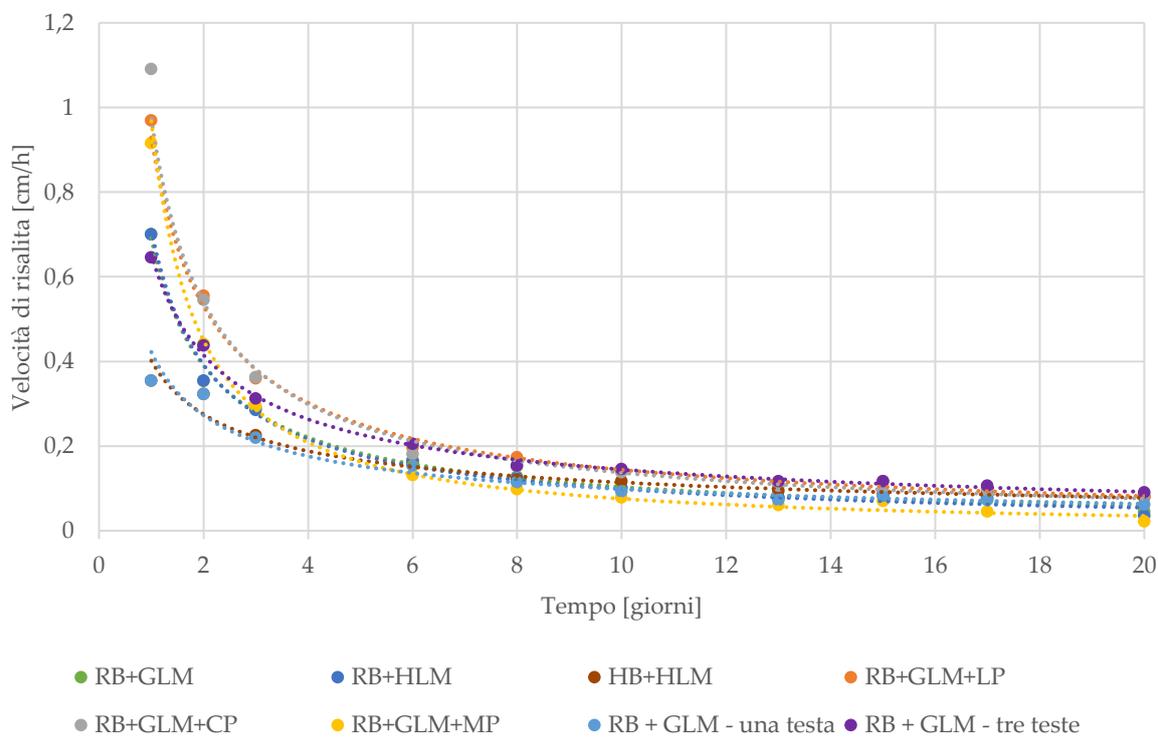


Figura 91. Velocità di risalita nelle murature simulate con WUFI, nei primi 20 giorni di imbibizione.

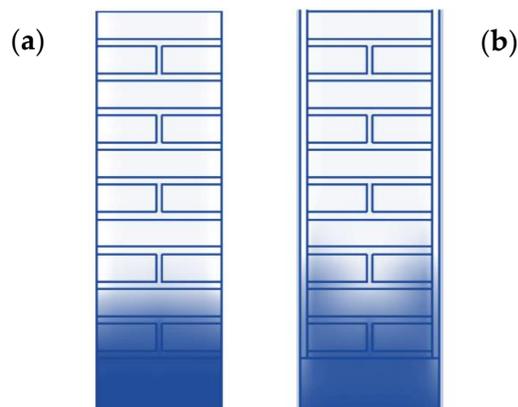


Figura 92. Trend di risalita capillare nelle murature “a vista” (a) e nelle murature intonacate (b).

La distribuzione del contenuto d’acqua varia sia con l’altezza sia con la profondità a cui si investiga la struttura. Nel basso della struttura si registra un quantitativo d’acqua elevata in prossimità del contatto con il terreno ricco d’acqua, che diminuisce con l’altezza, all’aumentare del processo di evaporazione. Tra la base della muratura (primi tre corsi), il centro (dal IV all’VIII mattone) e la parte superiore (dall’VIII mattone) si riscontrano delle differenze di accumulo d’acqua; alla base si ha un valore medio annuale del 65%, 25% nel mezzo e 10% nella parte superiore (Figura 93); ciò indica una rapida e completa saturazione dei materiali inferiori in breve tempo e il raggiungimento dell’equilibrio igrometrico.

Inoltre, nelle murature a vista, la maggior superficie di evaporazione del mattone ed il suo elevato grado di porosità, determina una maggior capacità di disperdere l’acqua dall’interno verso l’esterno.

Infatti, analizzando la struttura superficialmente e in profondità, si notano delle differenze di circa il 40-45% nel contenuto d’acqua (Figura 94). In profondità è possibile notare una quantità d’acqua maggiore ( $\sim 46 \text{ kg/m}^3$ ) rispetto agli strati più esterni (intonaco o primi 4 cm di mattone/malta,  $\sim 27 \text{ kg/m}^3$ ), in quanto questi ultimi sono costantemente soggetti a evaporazione e quindi rilasciano il contenuto umido sotto forma di vapore in aria.

In generale, tutte le strutture a due teste registrano mediamente un aumento del contenuto d’acqua del 76% nel primo giorno, 81% nel primo mese e 31% dopo un anno; ciò mostra quindi come il contenuto iniziale d’acqua evapori lentamente nel tempo, fino ad arrivare ad una situazione di equilibrio suzione-evaporazione.

A loro volta, il tasso di evaporazione e la suzione sono strettamente correlati alle condizioni climatiche, come temperatura, umidità relativa, precipitazioni, radiazioni e ventilazione. Queste ulteriori variabili al contorno sono state analizzate per comprendere meglio quanto possano influenzare il contenuto umido (WC) interno della muratura; partendo dalle condizioni iniziali  $T = 20^\circ\text{C}$  /  $\text{RH} = 50\%$ , la simulazione è stata effettuata considerando differenti condizioni climatiche: (i) l’ambiente interno di laboratorio e (ii) il clima della città di Venezia.

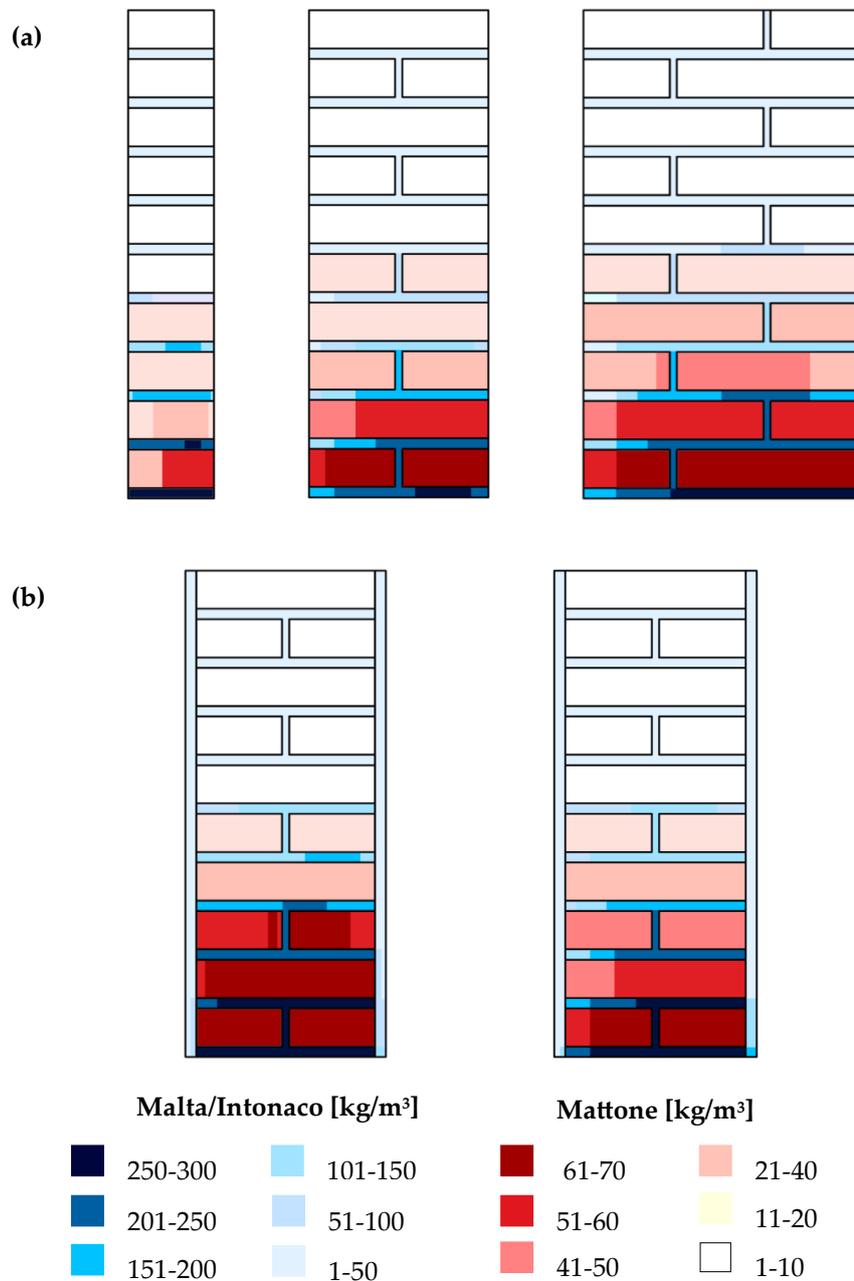


Figura 93. Distribuzione del contenuto d'acqua [kg/m<sup>3</sup>] nelle murature simulate, dopo 10 giorni di imbibizione: (a) murature "a vista"; (b) murature intonacate con CP (sinistra) e MP (destra).

In (i), dopo un mese di imbibizione WC decresce del 19% e dopo un anno del 69%. La muratura analizzata nelle condizioni ambientali (ii) ha un comportamento leggermente differente, ossia WC diminuisce mediamente dopo un mese del 17% e dopo un anno del 49%. Ciò evidenzia come il contenuto d'acqua rimanga più elevato se maggiormente influenzato da condizioni al contorno avverse (es. Venezia con elevata umidità relativa, Sali igroscopici, esposizione ad agenti atmosferici). Infatti, nella città è possibile osservare delle oscillazioni di temperatura tra -8 °C e +29 °C tra inverno ed estate, e umidità relativa in un range di 77±15 %. Nel "caso reale" è fondamentale considerare anche la prolungata esposizione nel tempo di queste condizioni,

come le numerose osservazioni effettuate negli edifici Veneziani. Inoltre, la radiazione solare considerata ha dei valori limite molto bassi per cui poco influenti nel fenomeno evaporativo, che vogliono replicare le condizioni tipiche del costruito veneziano, in quanto vista l'elevata densità edilizia e la vicinanza tra gli edifici, raramente la radiazione solare diretta raggiunge il piano terra degli edifici durante la giornata (valutazione effettuate in quanto la muratura analizzata si considera alta 1.00 m). Queste fluttuazioni sono difficilmente riscontrabili nei test sperimentali in laboratorio (ad esclusione di particolari condizioni applicate come al § 7.3.1). Nelle simulazioni igrometriche quindi, per la rappresentazione di casi estremi si sono modificate le condizioni iniziali dei materiali, con  $T = 15^{\circ}\text{C} / \text{RH} = 90\%$  (Figura 96), valutandone le differenze sia in condizioni microclimatiche controllate che in ambiente esterno. Dal grafico in Figura 97 si può osservare come WC vari a seconda di differenti parametri. In base al periodo di analisi si può notare come nel primo mese di suzione ci si un elevato contenuto d'acqua all'interno della struttura, che poi diminuisce una volta raggiunto l'equilibrio tra suzione ed evaporazione.

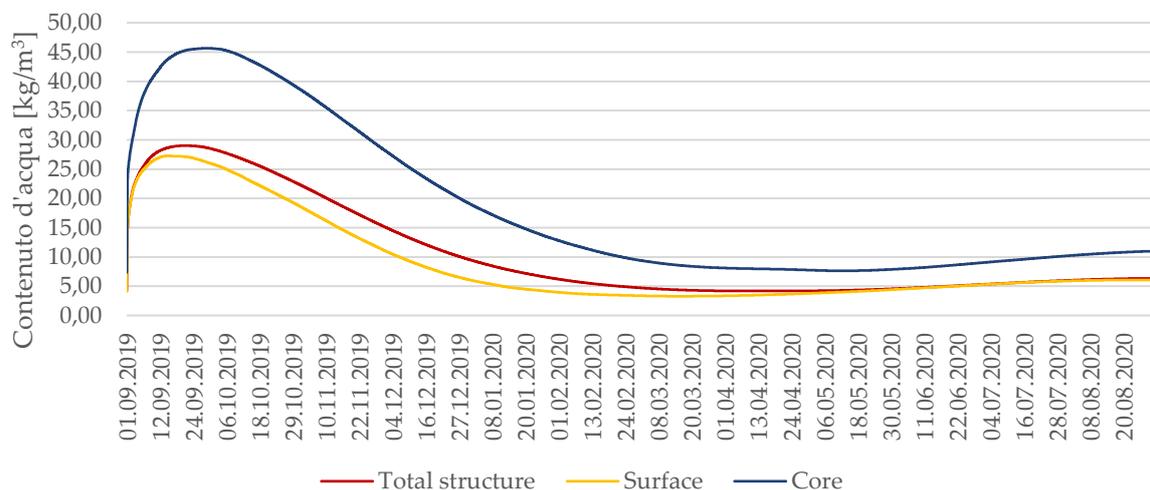


Figura 94. Variazione del contenuto d'acqua (periodo di analisi 1 anno) in profondità nella struttura di riferimento (RB + GLM) indagata in laboratorio (condizioni iniziali  $T = 20^{\circ}\text{C}$ ,  $\text{RH} = 50\%$ ).

Altra variabile sono le differenze che si riscontrano nei due climi indagati, ossia tra il laboratorio in condizioni controllate e le condizioni esterne Veneziane; in quest'ultimo caso, l'analisi della struttura in situ comporta un aumento, seppur ridotto (10%), correlato alle condizioni meteorologiche. Infine, ultimo parametro considerato è la variazione delle condizioni iniziali di temperatura e umidità relativa dei materiali indagati: in questo caso si può notare come WC vari notevolmente in una prima fase di imbibizione, portando ad aumenti considerevoli dello stesso in caso di umidità relativa elevata all'interno della struttura; in seguito ad una stabilizzazione della struttura il contenuto d'acqua diminuisce notevolmente e si riporta in linea alle condizioni standard di  $\text{RH} = 50\%$ .

Le variazioni tra i modelli simulati in laboratorio e il software possono presentare ulteriori piccole variazioni che dipendono dalla manifattura di realizzazione della muratura, che determina una certa instabilità nel comportamento, in quanto le performance calcolate per il

singolo prodotto non sono garantite, perché dipendono notevolmente anche dalla messa in opera e quindi da una certa disomogeneità del comportamento complessivo.

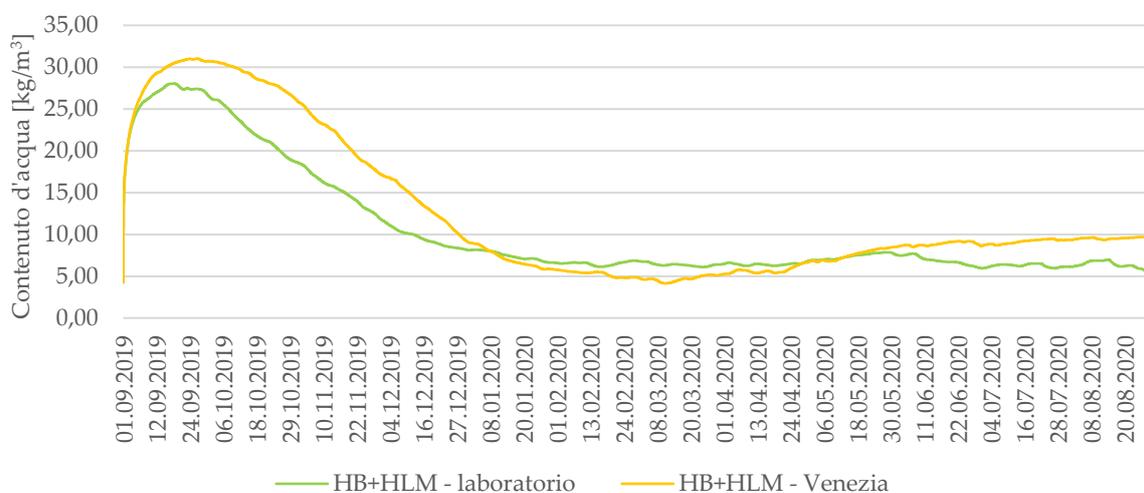


Figura 95. Variazione del contenuto d'acqua nel tempo (periodo di analisi 1 anno) nei modelli di muratura tradizionale (HB + HLM) indagata in laboratorio e Venezia (condizioni iniziali  $T = 20^{\circ}\text{C}$ ,  $\text{RH} = 50\%$ ).

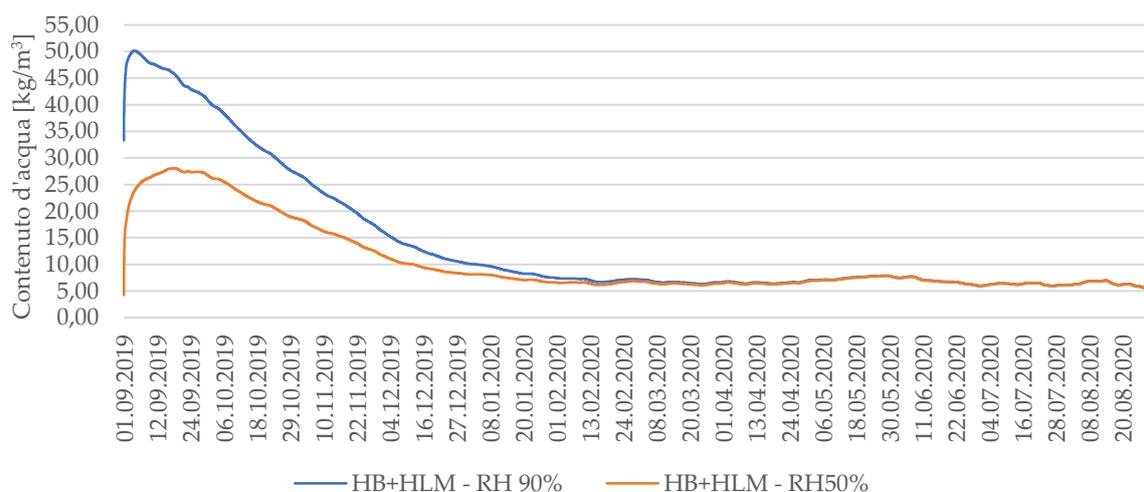


Figura 96. Variazione del contenuto d'acqua nel tempo (periodo di analisi 1 anno) nei modelli di muratura tradizionale (HB + HLM) indagata in laboratorio con differenti condizioni iniziali ( $T = 20^{\circ}\text{C}$  /  $\text{RH} = 50\%$ ;  $T = 15^{\circ}\text{C}$  /  $\text{RH} = 90\%$ ).

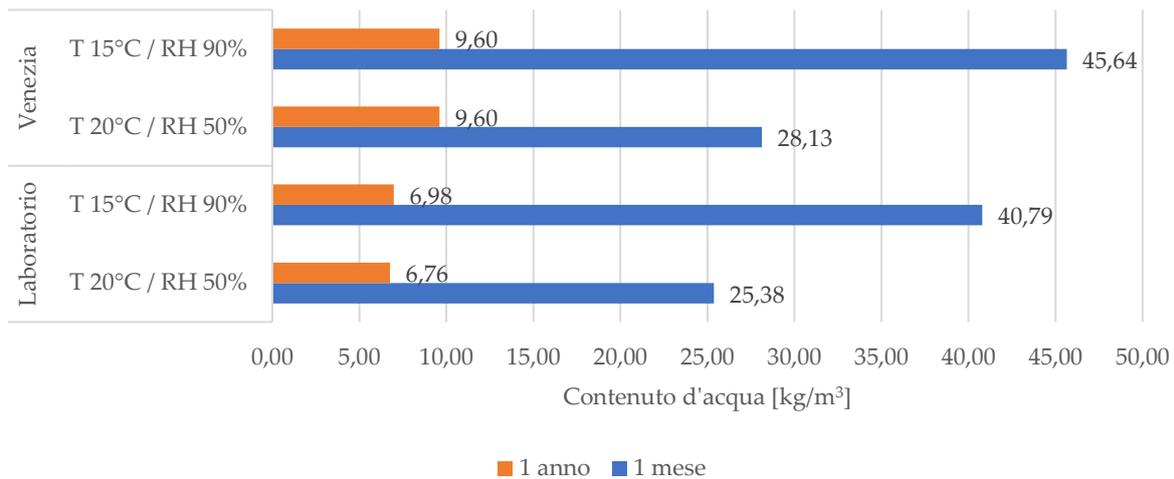


Figura 97. Contenuto d'acqua medio tra le murature simulate, in differenti condizioni al contorno.

## Conclusioni

Questa ricerca ha voluto affrontare il tema della conservazione del patrimonio costruito nella sua unicità, in particolare attraverso il tema dell'umidità da risalita capillare, fenomeno di rilevante importanza ma ancora poco chiaro, che causa grandi problemi alle strutture in generale. Venezia rappresenta un caso emblematico vista la posizione e la natura del suo costruito, che per molto tempo ha richiesto alle maestranze studi e ricerche per la preservazione dei manufatti. Gli interventi eseguiti finora non hanno però assicurato una garanzia di durabilità dei restauri nel tempo, e poco spesso anche un benessere dell'ambiente interno, con disagi ai fruitori stessi ed alle opere. Si è notata infatti la mancanza di normativa che definisca quali siano gli aspetti essenziali da salvaguardare, e non esistono protocolli che indichino le pratiche base da seguire in caso di diagnosi, manutenzione ed eventuale trattamento di restauro. Ancora più in particolare, il tema della risalita capillare è poco regolamentato dalla legislazione italiana, e chi se ne occupa sono principalmente aziende del settore edilizio che molto spesso si trovano ad essere promotrici di varie metodologie di analisi e tecnologie di trattamento, con limitata affidabilità scientifica.

La corretta preservazione è però possibile solo mediante un'approfondita conoscenza di ciò che si deve custodire. È quindi necessario avere un quadro generale dell'opera in oggetto (ricognizione bibliografica, conoscenza storica, tecnologica e materica degli elementi), prima di poter intervenire. La presenza di differenti materiali è molto diffusa in un apparato storico, in quanto nei secoli possono essersi susseguiti svariati interventi di restauro, eseguiti da personale differente (sia in termini di conoscenza che operatività), che possono dare origine a sistemi tecnologici e costruttivi completamente diversi, ossia una serie di variabili intrinseche che influenzano i degradi in maniera differente all'interno della stessa opera.

Entra in gioco quindi la necessità di definire un protocollo di diagnosi generale che riguardano i monitoraggi da eseguire in loco, successive analisi di laboratorio se necessarie, ed infine gli interventi possibili per garantire il mantenimento della costruzione.

L'utilizzo di differenti tecnologie di monitoraggio sul medesimo oggetto da indagare è di fondamentale importanza per ridurre l'incertezza di misura ottenuta da un singolo strumento, valutando l'efficacia e applicabilità di un determinato metodo in differenti strutture.

I metodi oggi diffusi per individuare l'umidità da risalita capillare, distruttivi e non distruttivi, permettono di ottenere dati simili ma che possono essere interpretati diversamente. I metodi distruttivi possono dare un'indicazione chiara del contenuto umido e sono ben definiti da normative nazionali e internazionali; è ben nota però la difficoltà di applicazione nel settore dei Beni Culturali, nonché la quasi impossibilità di ripetere le misure nel tempo, in quanto avviene una perdita di materiale. I metodi non invasivi hanno invece il notevole vantaggio di permettere una maggior velocità di acquisizione dei dati, con la possibilità di ripetere misurazioni nel tempo e confrontando ampie aree di indagine. Tra gli svantaggi si registra però la poca accuratezza immediatezza che le indagini possono dare, in quanto non offrono

un'indicazione precisa ed affidabile del contenuto d'acqua all'interno di una struttura, ma danno delle indicazioni in modo indiretto su scale relative allo strumento stesso. Necessitano quindi di una buona calibrazione e conoscenza tecnica da parte del personale specializzato per ottenere risultati significativi mediante l'integrazione e il confronto delle tecnologie attualmente diffuse.

Tale valutazione è inoltre strettamente correlata all'estrema variabilità delle situazioni reali. Il monitoraggio sul campo consiste nella raccolta di dati metrici per quanto riguarda lo stato di conservazione e/o del degrado, con riprese termografiche e altri metodi puntuali; la successiva elaborazione e interpretazione da parte di personale specializzato permetterà di ottenere dati non solo qualitativi (es. mappe termiche) ma anche quantitativi.

Si sottolinea l'importanza di ottenere un'analisi estesa ad una porzione significativa di muratura per poter distinguere e confrontare al meglio caratteristiche intrinseche ed estrinseche che possono influenzare il fenomeno:

- Variazioni su scala locale –porzione di materiale indagato (es. mattone), relative proprietà chimico-fisico-meccanico-mineralogico e tipologia costruttiva utilizzata;
- Variazioni su breve scala temporale (annuale) – stagionalità, condizioni climatiche esterne (T/RH, agenti atmosferici, possibili inondazioni da marea), e microclima ambiente interno;
- Variazioni su lunga scala temporale (più annualità) – valutazione dello svolgimento del processo di risalita.

L'unicità e irripetibilità di ogni edificio può mettere in risalto una serie di criticità nell'attività diagnostica: difficoltà nell'ottimizzazione e standardizzazione del metodo, nella definizione dei parametri utili alle analisi e nella modalità di valutazione delle informazioni raccolte, con cadenze variabili in base alle problematiche in esame riscontrate. La programmazione di un protocollo preventivo consiste quindi nella generazione di una serie di linee guida e riferimenti condivisi a livello generale, che consentano una corretta ed efficace definizione dei dati base da acquisire in ogni caso studio.

Tali osservazioni si sono riscontrate con i risultati ottenuti dalle analisi in laboratorio, in quanto divergono dalla realtà in ambiente urbano. Le condizioni climatiche, gli elementi che costituiscono una muratura e il complesso di variazioni che intercorrono tra le diverse parti degli edifici, sono variabili con una grande importanza nella definizione del fenomeno di risalita capillare e devono obbligatoriamente essere considerate durante la valutazione in ambiente esterno. I test in laboratorio hanno voluto mettere in risalto la necessità di eseguire diagnosi non invasive con cadenza temporale definita, in modo da valutare la distribuzione di umidità sull'intera superficie muraria, e la possibilità di riprodurre il fenomeno mediante modellazione e simulazione digitale per verificare e predire il comportamento in specifici contesti e/o tecnologie. Solo partendo da una completa conoscenza del modello in muratura (caratterizzazione materica, tecnologica e condizioni al contorno) è stato possibile avere dei risultati chiari ed interpretabili, utili alla maggior comprensione del fenomeno fisico di risalita ed alla futura stesura di un protocollo diagnostico.

## Bibliografia

- [1] I. Torres, "New technique for treating rising damp in historical buildings: Wall base ventilation," *Journal of Cultural Heritage*, vol. 31, pp. S60–S70, Jun. 2018, doi: 10.1016/j.culher.2018.04.015.
- [2] E. Pinto Guerra, *Risanamento di murature umide e degradate. Sintomi e cause - Rimedi - Soluzioni progettuali*, October 2017. in IV edizione. Dario Flaccovio Editore, 2017.
- [3] UNI 10339 *Impianti aeraulici al fini di benessere. Generalità, classificazione e requisiti. Regole per la richiesta d'offerta, l'offerta, l'ordine e la fornitura.* 1995. [Online]. Available: <http://store.uni.com/catalogo/uni-10339-1995>
- [4] UNI EN ISO 13788:2013 *Hygrothermal performance of building components and building elements - Internal surface temperature to avoid critical surface humidity and interstitial condensation - Calculation methods.* 2013.
- [5] UNI EN 15026:2008 *Hygrothermal performance of building components and building elements - Assessment of moisture transfer by numerical simulation.* 2008.
- [6] J. Straube, "Moisture and Materials," *Building Science Digest*, vol. 138, pp. 1–7, 2006.
- [7] N. May, "Breathability: The Key to Building Performance," *Sustainable Traditional Buildings Alliance (STBA)*, 2005, [Online]. Available: <https://responsible-retrofit.org/reference/>
- [8] K. K. Hansen, *Sorption isotherms A catalogue.* DTU Library, 1986.
- [9] A. S. Mujumdar and S. Devahastin, "Fundamental principles of drying," vol. One, pp. 1–22.
- [10] P. Matiasovsky and Z. Takacsova, "Sorption isotherms of interior finish materials," p. 8.
- [11] F. Bjork, B. Sederholm, J. Trägårdh, and B. Olofsson, "Electroosmosis – a method applied for handling of moisture in foundations," in *E3S Web of Conferences*, in 17010, vol. 172. Tallin: EDP Sciences, Jan. 2020, pp. 1–5. doi: 10.1051/e3sconf/202017217010.
- [12] B. H. Vos, "Suction of Groundwater," *Studies in Conservation*, vol. 16, no. 4, pp. 129–144, 1971, doi: 10.2307/1505493.
- [13] E. Rirsch and Z. Zhang, "Rising damp in masonry walls and the importance of mortar properties," *Construction and Building Materials*, vol. 24, no. 10, pp. 1815–1820, Oct. 2010, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2010.04.024.
- [14] G. Alfano, C. Chiancarella, E. Cirillo, I. Fato, and F. Martellotta, "Long-term performance of chemical damp-proof courses: Twelve years of laboratory testing," *Building and Environment*, vol. 41, no. 8, pp. 1060–1069, Aug. 2006, doi: 10.1016/j.buildenv.2005.04.017.
- [15] E. Franzoni, "State-of-the-art on methods for reducing rising damp in masonry," *Journal of Cultural Heritage*, vol. 31, pp. S3–S9, Jun. 2018, doi: 10.1016/j.culher.2018.04.001.
- [16] C. Hall and W. D. Hoff, "Rising damp: capillary rise dynamics in walls," *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 463, no. 2084, pp. 1871–1884, Aug. 2007, doi: 10.1098/rspa.2007.1855.
- [17] R. Castelluccio and V. Vitiello, "Performance analysis of method T.N.C. on masonries in tuff affected by capillary rising damp," in *Colloqui.AT.e 2016*, Matera: Gangemi Editore, Jan. 2016, pp. 204–2016.
- [18] M. Lee, "An experimental and analytical study of electrokinetic consolidation," Thesis for degree of Maste of Science, Oxford University, UK, St. Chaterine's College, 2000. Accessed: Jun. 13, 2023. [Online]. Available: <https://ora.ox.ac.uk/objects/uuid:0c70b070-b9c7-4daa-a55d-2bfc164abf0c>
- [19] C. Hall and W. D. Hoff, *Water transport in brick, stone and concrete.* Oxon: Taylor and Francis, 2002.
- [20] C. H. Hoff William D., *Water Transport in Brick, Stone and Concrete*, 3rd ed. London: CRC Press, 2021. doi: 10.1201/9780429352744.
- [21] F. R. D'Ambrosio, I. Fato, M. Filippi, and M. Stella, "Rising dampness phenomena. The research in progress," presented at the 9th International brick/block masonry Conference, Berlin, Germany: Deutsche Gesellschaft für Mauerwerksbau, 1991, pp. 1220–1226. [Online]. Available: <https://iris.poliba.it/handle/11589/23052#.YF2p8a9KhPY>

- [22] M. I. M. Torres and V. Peixoto de Freitas, "Treatment of rising damp in historical buildings: wall base ventilation," *Building and Environment*, vol. 42, no. 1, pp. 424–435, Jan. 2007, doi: 10.1016/j.buildenv.2005.07.034.
- [23] G. Massari and I. Massari, *Risanamento igienico dei locali umidi*, 5° edizione. HOEPLI, 1985.
- [24] M. Argiolas, *L'umidità da risalita muraria. Diagnosi e sistemi correttivi*. Santarcangelo di Romagna: Maggioli Editore, 2020.
- [25] UNI EN 1015-18 *Metodi di prova per malte per opere murarie - Determinazione del coefficiente di assorbimento d'acqua per capillarità della malta indurita*. 2004. [Online]. Available: <http://store.uni.com/catalogo/uni-en-1015-18-2004>
- [26] UNI EN 1925 *Metodi di prova per pietre naturali - Determinazione del coefficiente di assorbimento d'acqua per capillarità*. 2000. [Online]. Available: <http://store.uni.com/catalogo/uni-en-1925-2000>
- [27] UNI EN 772-11 *Metodi di prova per elementi per muratura - Parte 11: Determinazione dell'assorbimento d'acqua degli elementi per muratura di calcestruzzo, di calcestruzzo aerato autoclavato, di materiale lapideo agglomerato e naturale dovuto alla capillarità ed al tasso iniziale di assorbimento d'acqua degli elementi per muratura di laterizio*. 2011. [Online]. Available: <http://store.uni.com/catalogo/uni-en-772-11-2011>
- [28] M. S. Camino, F. J. León, A. Llorente, and J. M. Olivar, "View of Evaluation of the behavior of brick tile masonry and mortar due to capillary rise of moisture | *Materiales de Construcción*," *Materiales de Construcción*, vol. 64, no. 314, pp. 1–10, Jun. 2014.
- [29] G. Torraca, *Porous building materials. Materials Sciences for Architectural Conservations*, 3rd edition. Rome, Italy: ICCROM, 2005.
- [30] D. Camuffo, "Chapter 7 - Atmospheric Water, Capillary Rise, and Stone Weathering," in *Microclimate for Cultural Heritage*, Third Edition., in Measurement, Risk Assessment, Conservation, Restoration, and Maintenance of Indoor and Outdoor Monuments., Elsevier B.V., 2019, pp. 125–152. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780444641069000079?via%3Dihub>
- [31] E. Franzoni, "Rising damp removal from historical masonries: A still open challenge," *Construction and Building Materials*, vol. 54, pp. 123–136, Mar. 2014, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.12.054.
- [32] K. Agyekum, J. Ayarkwa, and C. Koranteng, "Controlling rising damp in new buildings: field trials of proposed treatment methods," in *Infrastructure as a driver for economic growth and integration in African: what is the way forward?*, South Africa: ICIDA, Jan. 2016, pp. 447–466.
- [33] L. Bertolini, L. Coppola, M. Gastaldi, and E. Redaelli, "Electroosmotic transport in porous construction materials and dehumidification of masonry," *Construction and Building Materials*, vol. 23, no. 1, pp. 254–263, Jan. 2009, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2007.12.013.
- [34] I. Franzin, "La risalita capillare: il fenomeno della cristallizzazione salina a Venezia. Con particolare riferimento al Marmo bianco di Carrara, la Pietra d'Istria e il Marmo rosso di Verona," *Corso di Collaboratore Restauratore dei Beni Culturali*, Università Internazionale dell'Arte, Venezia, 2009.
- [35] J. M. P. Q. Delgado, A. S. Guimarães, V. P. de Freitas, I. Antepará, V. Kolí, and R. Herný, "Salt Damage and Rising Damp Treatment in Building Structures," *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2016, p. 13, Oct. 2016.
- [36] G. Roche, "Metodi di indagine e diagnosi delle patologie da umidità negli edifici storici mediante analisi IRT (termografia a infrarossi)," in *Metodo scientifico ed innovazione tecnologica per la salvaguardia e recupero del patrimonio storico*, Ragusa, Oct. 2012, pp. 73–106.
- [37] D. Yu, S. A. Klein, and D. Reindl, "An evaluation of silica gel for humidity control in display cases," presented at the Western Association for Art Conservation, May 2001.
- [38] World Health Organization, *WHO guidelines for indoor air quality: dampness and mould*. Elisabeth Heseltine and Jerome Rosen, 2009.
- [39] V. Vitiello, R. Castelluccio, and M. Del Rio Merino, "Experimental research to evaluate the percentage change of thermal and mechanical performances of bricks in historical buildings due

- to moisture," *Construction and Building Materials*, vol. 244, p. 118107, May 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118107.
- [40] D. Camuffo, "Chapter 6 - Humidity and Deterioration Mechanisms," in *Microclimate for Cultural Heritage*, Third Edition., in Measurement, Risk Assessment, Conservation, Restoration, and Maintenance of Indoor and Outdoor Monuments. , Elsevier Science, 2019, pp. 93–123. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780444641069000067?via%3Dihub>
- [41] S. Lombardi, "Umidità nelle murature: diagnosi e recupero," Dottorato interpolo: Conservazione Integrata dei Beni Culturali ed Ambientali, Università degli Studi di Napoli "Federico II," Napoli, 2002.
- [42] UNI EN 16682 *Conservazione del patrimonio culturale - Metodi per la misurazione del contenuto igrometrico, o dell'acqua contenuto nei materiali costituenti i beni immobili del patrimonio culturale*. 2017. [Online]. Available: <http://store.uni.com/catalogo/uni-en-16682-2017>
- [43] R. Castelluccio, V. Vitiello, and M. Rossetto, "Umidità da risalita capillare. Il progetto di risanamento delle murature e la certificazione delle tecnologie," in *Tecnologie per il recupero del costruito. Umidità nelle costruzioni: diagnosi e metodi di intervento. Dal Taglio meccanico alla Tecnica a Neutralizzazione di Carica*, Matera: Luciano Editore, Apr. 2019, pp. 9–23.
- [44] L. Sellers, "Rising damp evaluation and treatment a quasi-experimental case study," Degree of Doctor of the Built Environment, University of Salford, Salford, UK, 2017.
- [45] R. Agliata, L. Mollo, and R. Greco, "Moisture measurements in heritage masonries: a review of current methods," *Materials Evaluation*, vol. 76, pp. 1468–1477, May 2018.
- [46] UNI EN ISO 11085 *Beni culturali - Materiali lapidei naturali ed artificiali - Determinazione del contenuto d'acqua: Metodo ponderale*. 2003. [Online]. Available: <http://store.uni.com/catalogo/uni-en-iso-11085-2015>
- [47] D. Camuffo, "Standardization activity in the evaluation of moisture content," *Journal of Cultural Heritage*, vol. 31, pp. S10–S14, Jun. 2018, doi: 10.1016/j.culher.2018.03.021.
- [48] UNI 11121 *Beni culturali - Materiali lapidei naturali ed artificiali - Determinazione in campo del contenuto di acqua con il metodo al carburo di calcio*. 2004. [Online]. Available: <http://store.uni.com/catalogo/uni-11121-2004>
- [49] F. Sandrolini and E. Franzoni, "An operative protocol for reliable measurements of moisture in porous materials of ancient buildings," *Building and Environment*, no. 41, pp. 1372–1380, 2006, doi: 10.1016/j.buildenv.2005.05.023.
- [50] A. TenWolde and G. E. Courville, "Instrumentation for Measuring Moisture in Building Envelopes," *ASHRAE Transactions*, vol. 91, no. 2, pp. 1101–1114, 1985.
- [51] K. Watanabe and S. Tada, "An Overview of Principles and Techniques of Moisture Properties Measurement for Building Materials and Components," presented at the France-Japan workshop on mass-energy transfer and deterioration of building materials and components, Tsukuba, Japan, Jan. 1998.
- [52] R. Burkinshaw, "Moisture on tap," *Journal of Building Appraisal*, vol. 2, pp. 62–68, Mar. 2006, doi: 10.1057/palgrave.jba.2940039.
- [53] J. H. Zhao, D. J. Thomson, E. Murison, G. J. van Rijn, A. De Mey, and G. Mustapha, "Calibration of dielectric based moisture sensing in stone, mortar and stone-mortar sandwiches," *J Civil Struct Health Monit*, vol. 4, no. 4, pp. 277–288, Nov. 2014, doi: 10.1007/s13349-014-0086-3.
- [54] F. Ercolani, "Diagnosi non distruttiva del patrimonio storico-architettonico: applicazioni in laboratorio e in sito presso il Duomo di Modena e La Ghirlandina," Tesi di laurea in Meccanica dei materiali innovativi LS, Alma Mater Studiorum – Università di Bologna, Bologna, 2010.
- [55] L. Mollo and R. Greco, "Misure di umidità in murature di tufo con la time domain reflectometry," presented at the IX International Forum Le Vie dei Mercanti, Aversa, Capri, Oct. 2011, pp. 1–7.
- [56] Z. Suchorab, "Laboratory measurements of moisture in a model red-brick wall using the surface TDR probe," presented at the ECOpole, 2013. doi: 10.2429/proc.2013.7(1)022.

- [57] R. Agliata, L. Mollo, and R. Greco, "Use of TDR to Compare Rising Damp in Three Tuff Walls Made with Different Mortars," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 29, no. 4, p. 04016262, Apr. 2017, doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001794.
- [58] K. Wilhelm, H. Viles, and Ò. Burke, "The Influence of Salt on Handheld Electrical Moisture Meters: Can They Be Used to Detect Salt Problems in Porous Stone?," *International Journal of Architectural Heritage*, vol. 10, no. 6, pp. 735–748, Aug. 2016, doi: 10.1080/15583058.2015.1109733.
- [59] E. Gabrielli, "Experimental assessment of environmental decay effects in masonry via non destructive diagnostic techniques and mechanical tests," Dottorato di Ricerca in Ingegneria dei Materiali, Alma Mater Studiorum – Università di Bologna, Bologna, 2014.
- [60] R. Agliata, T. Bogaard, R. Greco, L. Mollo, E. Slob, and S. Steele-Dunne, "Non-invasive estimation of moisture content in tuff blocks by GPR," *Construction and Building Materials*, vol. 160, Dec. 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.11.103.
- [61] E. Capovilla, "Studio chimico fisico di malte idrofobizzate in massa esposte all'azione aggressiva di sali," Tesi di Laurea, Università Ca' Foscari Venezia, Venezia, 2013.
- [62] A. Menezes, M. Glória Gomes, and I. Flores-Colen, "In-situ assessment of physical performance and degradation analysis of rendering walls," *Construction and Building Materials*, vol. 75, pp. 283–292, Jan. 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.11.039.
- [63] C. Lerma, Á. Mas, E. Gil Benso, J. Vercher, and M. J. Martínez, "Pathology of building materials in historic buildings. Relationship between laboratory testing and infrared thermography," *Materiales de Construcción*, vol. 64, no. 313, p. e009, Mar. 2013, doi: 10.3989/mc.2013.06612.
- [64] G. Roche, *La termografia per l'edilizia e l'industria. Manuale operativo per le verifiche termografiche*. in Professione in tasca. Santarcangelo di Romagna: Maggioli Editore, 2012.
- [65] E. Rosina, N. Ludwig, and V. Redaelli, "Metodi per la misura dell'umidità nei materiali dell'edilizia storica: legno e intonaci," p. 9.
- [66] R. Agliata, T. A. Bogaard, R. Greco, A. Minardo, L. Mollo, and S. C. Steele-Dunne, "Non-invasive water content estimation in a tuff wall by DTS," *Construction and Building Materials*, vol. 197, pp. 821–829, Feb. 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.11.250.
- [67] N. Harmathy, Ž. Jakšić, M. Trivunić, and V. Milovanović, "Rising damp analysis and selection of optimal handling method in masonry construction," *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, vol. 58, no. 4, pp. 431–444, Jan. 2014, doi: 10.3311/PPci.2113.
- [68] I. Torres and V. Freitas, "The influence of the thickness of the walls and their properties on the treatment of rising damp in historic buildings," *Construction and Building Materials - CONSTR BUILD MATER*, vol. 24, pp. 1331–1339, Aug. 2010, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2010.01.004.
- [69] EMERISDA, "Summary report on existing methods against rising damp D2.1 FINAL version 31-07-2014," TU Delft, Delft, Final version D2.1, Jul. 2014. [Online]. Available: [https://www.emerisda.eu/wp-content/uploads/2014/07/D-2\\_1.pdf](https://www.emerisda.eu/wp-content/uploads/2014/07/D-2_1.pdf)
- [70] F. Doglioni and G. Mirabella Roberti, *Venezia. Forme della costruzione. Forme del dissesto*, Prima. Venezia: Libreria Cluva Editrice, 2011.
- [71] F. Tamas and I. Tuns, "Removing capillary moisture from brick walls using a drying method and case study," *Bulletin of the Transilvania University of Brasov*, vol. 3, no. 52, pp. 323–328, 2008.
- [72] P. Lopez-Arce, E. Doehne, J. Greenshields, D. Benavente, and D. Young, "Treatment of rising damp and salt decay: the historic masonry buildings of Adelaide, South Australia," *ResearchGate*, doi: 10.1617/s11527-008-9427-1.
- [73] C. Aghemo and I. Falò, "Rising dampness in masonry: some experimental results," *Thermal Envelopes*, vol. VI, pp. 407–414, 1995.
- [74] B. Lubelli and R. P. J. van Hees, "Desalination of masonry structures: Fine tuning of pore size distribution of poultices to substrate properties," *Journal of Cultural Heritage*, vol. 11, no. 1, pp. 10–18, Jan. 2010, doi: 10.1016/j.culher.2009.03.005.
- [75] R. Wójcik, A. Panuś, M. Tunkiewicz, and M. Hamdy, "Influence of chemical damp proof cream on the capillary action and microstructure of mortars," *Energy Procedia*, vol. 132, pp. 670–675, Oct. 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.10.004.

- [76] R. P. J. van Hees, B. Lubelli, and A. Hacquebord, "New test methods to verify the performance of chemical injections to deal with rising damp," *Journal of Cultural Heritage*, vol. 31, pp. S52–S59, Jun. 2018, doi: 10.1016/j.culher.2018.03.024.
- [77] *UNI EN 998-1 Specifiche per malte per opere murarie - Parte 1: Malte per intonaci interni ed esterni*. 2016. [Online]. Available: [http://store.uni.com/catalogo/uni-en-998-1-2016?josso\\_back\\_to=http://store.uni.com/josso-security-check.php&josso\\_cmd=login\\_optional&josso\\_partnerapp\\_host=store.uni.com](http://store.uni.com/catalogo/uni-en-998-1-2016?josso_back_to=http://store.uni.com/josso-security-check.php&josso_cmd=login_optional&josso_partnerapp_host=store.uni.com)
- [78] *UNI EN 998-2:2016 Specifiche per malte per opere murarie - Parte 2: Malte da muratura*. 2016. [Online]. Available: <http://store.uni.com/catalogo/uni-en-998-2-2016>
- [79] C. Riminesi, A. Sansonetti, and A. Scala, "Assessment of the effectiveness of a dehumidification system by emission of electromagnetic fields: Proposal of a protocol," *Journal of Cultural Heritage*, vol. 31, pp. S46–S51, Jun. 2018, doi: 10.1016/j.culher.2018.04.002.
- [80] Y. Vanhellefont *et al.*, "Are electrokinetic methods suitable for the treatment of rising damp?," *Journal of Cultural Heritage*, vol. 31, pp. S23–S29, Jun. 2018, doi: 10.1016/j.culher.2018.04.010.
- [81] ATENA s.r.l., "Atena - Quantum Technology," atena. inspired by water. Accessed: Jun. 13, 2023. [Online]. Available: <https://atena.green/technology>
- [82] J. Melada, M. Gargano, I. Veronese, and N. Ludwig, "Does electro-osmosis work in moisture damage prevention? Applicability of infrared-based methods to verify water distribution under electric fields," *Journal of Cultural Heritage*, vol. 31, pp. S38–S45, Jun. 2018, doi: 10.1016/j.culher.2018.04.009.
- [83] C. J. Kim, "Electrowetting," in *Encyclopedia of Nanotechnology*, B. Bhushan, Ed., Dordrecht: Springer Netherlands, 2016, pp. 1117–1123. doi: 10.1007/978-94-017-9780-1\_305.
- [84] F. Doglioni, L. Scappin, A. Squassina, and F. Trovò, *Conoscenza e restauro degli intonaci e delle superfici murarie esterne di Venezia. Campionature, esemplificazioni, indirizzi di intervento*, 1st ed. Saonara (Pd): Il Prato Casa Editrice, 2017.
- [85] V. Fontana, "Appunti sulle malte e i mattoni in uso nei cantieri veneziani del Cinquecento da documenti e trattati dell'epoca," presented at the Il Mattone di Venezia. Stato delle conoscenze tecnico-scientifiche, Venezia, Fondazione Cini, 1979.
- [86] R. Chiovelli, *Lisciature e stilature dei giunti nelle murature storiche: aspetti cronologici, culturali e conservativi*, Numero speciale 2019., vol. primo, 2 vols. Sapienza - Università di Roma: "L'Erma" di Bretschneider, 2020.
- [87] G. Fazzini and F. Varosio, "Mattoni storici veneziani," *Archeo Venezia*, vol. XI, no. 3–4, pp. 91–94, Dec. 2001.
- [88] G. Fazio, S. Hreglich, L. Lazzarini, U. Piredda, and M. Verità, "Le Altinelle a Venezia: problemi storici, caratterizzazione chimico-fisica, cause di deterioramento," presented at the Il mattone di Venezia. Contributi presentati al concorso di idee su patologia, diagnosi e terapia del mattone di Venezia, Laboratorio per lo studio della dinamica delle grandi masse del CNR e dell'Università di Venezia, Oct. 1982, pp. 227–269.
- [89] A. Croatto, "Il mattone da costruzione - aspetti chimico-fisici," presented at the Il Mattone di Venezia. Stato delle conoscenze tecnico-scientifiche, Venezia, 1979.
- [90] J.-B. Rondelet, *Traité théorique et pratique de l'art de bâtir*, vol. 4, 6 vols. Paris: Chez L'auteur, 1802. [Online]. Available: <https://www.edition-originale.com/it/libri-antichi-1455-1820/editions-originales/rondelet-traite-theorique-et-pratique-de-lart-1802-51245>
- [91] M. Fogliata and M. L. Sartor, *L'arte dello stucco. Storia, tecnica, metodologie della tradizione veneziana*, Seconda. Treviso: Edizioni Antilias, 2004.
- [92] Z. Zhang, J. Liu, B. Li, G. Yu, and L. Li, "Experimental study on factors affecting the physical and mechanical properties of shell lime mortar," *Construction and Building Materials*, vol. 228, p. 116726, Dec. 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.116726.
- [93] L. Binda Mayer and G. Baronio, "Indagine sull'aderenza tra legante e laterizio in malte ed intonaci di 'cocciopesto,'" *Ministero dei Beni e delle attività culturali - Bollettino d'Arte*, pp. 109–115, 1986.

- [94] R. Castelluccio, *I fenomeni di umidità sulle murature in tufo giallo napoletano. La risalita capillare. Gli interventi con intonaci da risanamento. Teoria - Tecnica - Sperimentazione*, 1st ed., vol. 1, 1 vols. Napoli: Luciano Editore, 2012. [Online]. Available: <https://www.iris.unina.it/handle/11588/575779>
- [95] E. Francia and L. Vantagnoli, *Manuale per il restauro e la manutenzione delle facciate*, 1°, vol. 1, 2 vols. Atena Academy, 2021. [Online]. Available: [www.atena-academy.it](http://www.atena-academy.it)
- [96] E. Armani, "L'indagine sugli intonaci dell'edilizia storica veneziana," in *Il colore nell'edilizia storica. Riflessioni e ricerche sugli intonaci le coloriture*, Bollettino d'Arte., in 6. , Istituto poligrafico e Zecca dello Stato - Libreria dello Stato, 1984, pp. 37–40. [Online]. Available: [http://www.biblioarti.beniculturali.it/opencms/export/BollettinoArteIt/sito-BollettinoArteIt/Contributi/Editoria/BollettinoArte/Allegati\\_Supplementi/visualizza\\_asset.html\\_140715862.html](http://www.biblioarti.beniculturali.it/opencms/export/BollettinoArteIt/sito-BollettinoArteIt/Contributi/Editoria/BollettinoArte/Allegati_Supplementi/visualizza_asset.html_140715862.html)
- [97] L. Lazzarini, "I materiali lapidei dell'edilizia storica veneziana," in *Restauro & Città*, vol. II, in 3/4, vol. II. , 1986, pp. 84–100.
- [98] G. Biscontin, V. Fassina, P. Maravelaki, and E. Zendri, "Venice: Stone material behaviour in connection with the environment." 1990.
- [99] M. Piana, "'Bella et mirabil cosa è la materia delle pietre vive, che sono condotte da Rovigno'. Note sull'estrazione, l'impiego, la patinatura della pietra d'Istria a Venezia," in *La pietra d'Istria e Venezia*, Venezia: Cierre Edizioni, Oct. 2003, pp. 63–76. Accessed: Mar. 30, 2023. [Online]. Available: [https://www.academia.edu/26467818/\\_Bella\\_et\\_mirabil\\_cosa\\_%C3%A8\\_la\\_materia\\_delle\\_pietre\\_vive\\_che\\_sono\\_condotte\\_da\\_Rovigno\\_pdf](https://www.academia.edu/26467818/_Bella_et_mirabil_cosa_%C3%A8_la_materia_delle_pietre_vive_che_sono_condotte_da_Rovigno_pdf)
- [100] L. Lazzarini, "Pietra d'Istria: genesi, proprietà e cavatura della pietra di Venezia.," in *La Pietra d'Istria e Venezia*, Venice: Cierre Edizioni, 2006, pp. 23–45. Accessed: May 24, 2023. [Online]. Available: <https://air.iuav.it/handle/11578/6567>
- [101] L. Lazzarini, "Pietra d'Istria: uso, genesi, proprietà, cavatura e forme di deterioramento della pietra di Venezia," in *HISTRIA TERRA*, vol. 9, in Supplemento a Atti e Memorie della Società Istriana di Archeologia e Storia Patria, vol. 9. , Venezia: Tipografia Cartotecnica Veneziana s.r.l., 2008, pp. 7–43.
- [102] L. Lazzarini, F. Antonelli, S. Cancelliere, and A. Conventi, "The deterioration of Euganean Trachyte in Venice," in *Proceedings of the 11th International Congress on deterioration and conservation of stone*, Torun, Poland: Jadwiga W. Lukaszewicz, Piotr Niemcewicz, Sep. 2008, pp. 153–163.
- [103] CNR, ICR, *Normal 1/88 Alterazioni macroscopiche dei materiali lapidei: lessico*. 1990.
- [104] UNI 11182 *Beni culturali - Materiali lapidei naturali ed artificiali - Descrizione della forma di alterazione - Termini e definizioni*. 2006. [Online]. Available: [http://store.uni.com/catalogo/uni-11182-2006?josso\\_back\\_to=http://store.uni.com/josso-security-check.php&josso\\_cmd=login\\_optional&josso\\_partnerapp\\_host=store.uni.com](http://store.uni.com/catalogo/uni-11182-2006?josso_back_to=http://store.uni.com/josso-security-check.php&josso_cmd=login_optional&josso_partnerapp_host=store.uni.com)
- [105] Vitruvius Pollio and C. Amati, *Dell'architettura di Marco Vitruvio Pollione libri dieci, pubblicati da Carlo Amati*. Milano, Giacomo Pirola, 1829. Accessed: Sep. 01, 2023. [Online]. Available: <http://archive.org/details/dellarchitettura01vitr>
- [106] L. B. Alberti, *L'Architettura [De Re Aedificatoria]*. Milano: Edizioni Il Polifilo, 1966.
- [107] F. Milizia, *Principj di Architettura Civile*, Seconda. Milano: Per Serafino Maiocchi, 1847.
- [108] J.-B. Rondelet, *Trattato Teorico e Pratico dell'arte di Edificare*, Sesta. Mantova: Antiche Fornaci Giorgi, 1831.
- [109] *Il mattone di Venezia: stato delle conoscenze tecnico-scientifiche. Atti del Convegno presso la Fondazione Cini, 22-23 ottobre 1979*, Cini Foundation. Venezia: Laboratorio per lo Studio della Dinamica delle Grandi Masse del CNR e dell'Università di Venezia, 1979.
- [110] *Il mattone di Venezia: contributi presentati al concorso di idee su patologia, diagnosi e terapia del mattone di Venezia. Ateneo Veneto, Venezia, 29 ottobre 1982*, Cini Foundation. Venezia: Laboratorio per lo Studio della Dinamica delle Grandi Masse del CNR e dell'Università di Venezia, 1982.

- [111] G. Biscontin, G. Riva, and F. Zago, "Caratteristiche chimiche, fisiche e meccaniche della struttura muraria," *Ministero dei Beni e delle attività culturali - Bollettino d'Arte*, pp. 43–50, 1983.
- [112] V. Fassina, "Crypt of S. Marco Basilica: CONSOLIDATION TREATMENTS," *ECHNLR*, vol. 8, no. 2, pp. 35–42, 1994.
- [113] A. Bakolas *et al.*, "Chemico-Physical Interactions Among the Constituents of Historical Walls in Venice," presented at the MRS Symposium Proceeding, 1995, pp. 771–777.
- [114] V. Fassina, M. Favaro, and D. Melica, "Brick-Wall Masonry Decay Patterns and In Situ Evaluation of the Effectiveness of Treatments of Torre Alberaria in Venice," presented at the Hydrophobe VI 6th International Conference on Water Repellent Treatment of Building Materials, Aedificatio Publishers, 2011, pp. 217–234.
- [115] E. Tesser, L. Lazzarini, M. Verità, and R. Falcone, "Caratterizzazione chimico-fisica di mattoni gotici veneziani," *SCIENCE AND TECHNOLOGY FOR CULTURAL HERITAGE*, vol. 21, pp. 63–87, 2012.
- [116] P. Foraboschi and A. Vanin, "Experimental investigation on bricks from historical Venetian buildings subjected to moisture and salt crystallization," *Engineering Failure Analysis*, vol. 45, pp. 185–203, 2014.
- [117] F. Zago, G. Biscontin, G. Michelon, G. Riva, and N. Valle, "Indagine chimica, fisica e meccanica di murature storiche a Venezia e proposte di risanamento," presented at the Il mattone di Venezia. Contributi presentati al concorso di idee su patologia, diagnosi e terapia del mattone di Venezia, Venezia: Laboratorio per lo studio della dinamica delle grandi masse del CNR e dell'Università di Venezia, Oct. 1982, pp. 175–209.
- [118] V. Fassina, R. Arbizzani, A. Naccari, and M. Favaro, "Brick Masonry of the Crypt of San Marco Basilica Evaluation of On-site Desalination Experiments and Laboratory Consolidation Treatments," in *Conservation of Historic Brick Structures*, N.S. Baer, S. Fitz and R.A. Livingstone Donhead, pp. 406–426.
- [119] V. Fassina and A. G. Stevan, "The moisture behaviour in Venetian buildings structures," presented at the Presented at NATO-CCMS PiLot Study "Conservation of Historic Brick Structures" 4th Expert Meeting, Amsterdam: NATO-CCMS Pilot Study of Historic Brick Structures, Oct. 1990, pp. 61–73.
- [120] G. Biscontin, V. Fassina, L. Lazzarini, and R. Mazzon, "Studio dell'umidità ascendente, delle caratteristiche fisiche delle murature di Palazzo Badoer e prove di desalinificazione," presented at the Il mattone di Venezia. Stato delle conoscenze tecnico-scientifiche, Venezia, Fondazione Cini: Laboratorio per lo studio della dinamica delle grandi masse del CNR e dell'Università di Venezia, Oct. 1979.
- [121] G. Biscontin, R. Ganzerla, M. Lenarda, G. Michelon, and A. Valle, "Indagine sui fenomeni di risalita capillare nelle murature di Venezia," presented at the Il mattone di Venezia. Contributi presentati al concorso di idee su patologia, diagnosi e terapia del mattone di Venezia, Venezia: Istituto per lo studio della dinamica delle grandi masse del CNR, Oct. 1982, pp. 33–65.
- [122] G. Biscontin, V. Fassina, and E. Zendri, "Il comportamento dei materiali lapidei a Venezia in relazione all'ambiente," presented at the La conservazione dei monumenti nel barino del Mediterraneo Influenza dell'ambiente costiero e dello spray marino sulla pietra calcarea e sul marmo, Bari: Fulvio Zezza, Jun. 1989, pp. 195–201.
- [123] G. Mirabella Roberti, F. Trovò, Mi. Bondanelli, and S. Cancelliere, "Studies on behaviour of Venetian masonry made of Altinella bricks," in *Scientific Research and Safeguarding of Venice 2006. CORILA Research Programme 2004 - 2006. 2005 Results*, Venezia: Pierpaolo Campostrini, 2007, pp. 73–88.
- [124] G. Baronio and L. Binda, "Durabilità dei mattoni piani in funzione delle loro caratteristiche chimico-fisiche e meccaniche," presented at the Il mattone di Venezia. Contributi presentati al concorso di idee su patologia, diagnosi e terapia del mattone di Venezia, Venezia: Istituto per lo studio della dinamica delle grandi masse del CNR, Oct. 1982, pp. 1–30.

- [125] V. Fassina and A. Rattazzi, "The original capitals of Ducal Palace, Venice : preliminary analyses on Istrian stone surfaces," in *Preservation and restoration of cultural heritage: proceedings of the 1995 LCP Congress*, Montreux: Laboratoire de conservation de la pierre 1996, 1996, pp. 383–391.
- [126] G. Biscontin, M. Piana, and G. Riva, "Research on limes and intonaco of the historical Venetian architecture: Characterization of some Marmorino intonaco from the 16th to the 17th century," in *Mortars, cements and grouts used in the conservation of historic buildings*, Rome, Italy: Iccrom 1982, 1982, pp. 359–373.
- [127] V. Fassina, M. Favaro, A. Naccari, and M. Pigo, "Evaluation of compatibility and durability of a hydraulic lime-based plaster applied on brick wall masonry of historical buildings affected by rising damp phenomena," *Journal of Cultural Heritage*, vol. 3, no. 1, pp. 45–51, Apr. 2002, doi: 10.1016/S1296-2074(02)01158-5.
- [128] F. Antonelli, S. Cancelliere, and L. Lazzarini, "Minero-petrographic characterisation of historic bricks in the Arsenale, Venice," *Journal of Cultural Heritage - J CULT HERIT*, vol. 3, pp. 59–64, Apr. 2002, doi: 10.1016/S1296-2074(02)01160-3.
- [129] "Centro Previsioni e Segnalazioni Maree," Comune di Venezia. Accessed: May 13, 2023. [Online]. Available: <https://www.comune.venezia.it/it/content/centro-previsioni-e-segnalazioni-maree>
- [130] T. Spencer, R. J. S. Spence, J. Da Mosto, and C. A. Fletcher, "Introduction: urban flooding and the urban system," in *Flooding and Environmental Challenges for Venice and its Lagoon: State of Knowledge*, Cambridge University Press, 2005, pp. 143–145.
- [131] M. Spinelli and M. Folin, "Local flood protection measures in Venice," in *Flooding and Environmental Challenges for Venice and its Lagoon: State of Knowledge*, Cambridge University Press, 2005, pp. 147–158. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/urban-flooding>
- [132] E. Rosso and M. Cordella, "Progetto: 'Ricostruzione della serie storica di Venezia - Punta della Salute (1924-2005),'", ISPRA Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale, APAT Agenzia Per la protezione dell'Ambiente e per i Servizi Tecnici.
- [133] "MOSE Venezia." Accessed: May 13, 2023. [Online]. Available: <https://www.mosevenezia.eu/?lang=en>
- [134] Regione del Veneto, "Legge Speciale - Regione del Veneto," Il portale della Regione Veneto. Accessed: Jul. 24, 2023. [Online]. Available: <https://www.regione.veneto.it/web/ambiente-e-territorio/legge-speciale>
- [135] V. Apih and M. Makarovic, "Development of a method for drying out the damp walls of buildings in Venice," *Transactions on the Built Environment*, vol. 4, pp. 635–642, 1993.
- [136] UNESCO World Heritage Centre, "World Heritage Reports n°22 - Climate Change and World Heritage," UNESCO World Heritage Centre, Vilnius, Lithuania, 22, May 2007. Accessed: Apr. 12, 2023. [Online]. Available: <https://whc.unesco.org/en/activities/474/>
- [137] L. Falchi, D. Slanzi, E. Balliana, G. Driussi, and E. Zendri, "Rising damp in historical buildings: A Venetian perspective," *Building and Environment*, vol. 131, pp. 117–127, 2018.
- [138] G. Albanesi, T. De Chiffre, and A. Morone, "Trattamento delle murature umide," presented at the Il mattone di Venezia. Contributi presentati al concorso di idee su patologia, diagnosi e terapia del mattone di Venezia, Venezia: Istituto per lo studio della dinamica delle grandi masse del CNR, Oct. 1982, pp. 325–375.
- [139] G. Riva and F. Peron, "Caratterizzazione del comportamento igrometrico di murature Veneziane con il metodo ponderale," Dipartimento di Costruzione dell'Architettura, Istituto Universitario di Architettura Venezia, 13/FT, Mar. 1999.
- [140] CORILA Consorzio per il coordinamento delle ricerche inerenti al sistema lagunare di Venezia, "Venezia 2021. Programma di ricerca scientifica per una laguna 'regolata,'" Venezia2021. Accessed: Jun. 19, 2023. [Online]. Available: [http://venezia2021.corila.it/home\\_ve2021/](http://venezia2021.corila.it/home_ve2021/)
- [141] Insula spa, "Sistema di manutenzione urbana Venezia." Accessed: May 15, 2023. [Online]. Available:

- [http://smu.insula.it/index.php?option=com\\_content&view=article&id=114&Itemid=81&lang=it.html](http://smu.insula.it/index.php?option=com_content&view=article&id=114&Itemid=81&lang=it.html)
- [142] UNI EN 771-1:2015 *Specification for masonry units - Part 1: Clay masonry units*. 2015.
- [143] C. Coletti, G. Cultrone, L. Maritan, and C. Mazzoli, "How to face the new industrial challenge of compatible, sustainable brick production: Study of various types of commercially available bricks," *Applied Clay Science*, vol. 124–125, pp. 219–226, May 2016, doi: 10.1016/j.clay.2016.02.014.
- [144] UNI EN 772-16 *Metodi di prova per elementi per muratura - Parte 16: Determinazione delle dimensioni*. 2011. [Online]. Available: <http://store.uni.com/catalogo/uni-en-772-16-2011>
- [145] UNI EN 772-13 *Metodi di prova per elementi di muratura - Determinazione della massa volumica a secco assoluta e della massa volumica a secco apparente degli elementi di muratura (ad eccezione della pietra naturale)*. 2002. [Online]. Available: <http://store.uni.com/catalogo/uni-en-772-13-2002>
- [146] UNI 11060 *Beni culturali - Materiali lapidei naturali ed artificiali - Determinazione della massa volumica e della percentuale di vuoti*. 2003. [Online]. Available: <http://store.uni.com/catalogo/uni-11060-2003>
- [147] CNR, ICR, *Normal 4/80: Distribuzione del volume dei pori in funzione del loro diametro*. 1980.
- [148] UNI EN 15801 *Conservazione dei beni culturali - Metodi di prova - Determinazione dell'assorbimento dell'acqua per capillarità*. 2010. [Online]. Available: <http://store.uni.com/catalogo/uni-en-15801-2010>
- [149] UNI, UNI EN 13755:2008 - *Natural stone test methods - Determination of water absorption at atmospheric pressure*. 2008. Accessed: Apr. 27, 2023. [Online]. Available: <https://store.uni.com/en/uni-en-13755-2008>
- [150] CNR, ICR, *Normal 29/88: Misura dell'indice di asciugamento (drying index)*. 1988.
- [151] UNI EN 1745:2020. 2020. [Online]. Available: [http://store.uni.com/catalogo/uni-en-1745-2020?josso\\_back\\_to=http://store.uni.com/josso-security-check.php&josso\\_cmd=login\\_optional&josso\\_partnerapp\\_host=store.uni.com](http://store.uni.com/catalogo/uni-en-1745-2020?josso_back_to=http://store.uni.com/josso-security-check.php&josso_cmd=login_optional&josso_partnerapp_host=store.uni.com)
- [152] UNI, UNI 10351:2021 *Building materials - Thermo-hygrometric properties - Procedure for determining the design values*. 2021. Accessed: Mar. 09, 2023. [Online]. Available: <https://store.uni.com/en/uni-10351-2021>
- [153] UNI EN 772-1 *Metodi di prova per elementi per muratura - Parte 1: Determinazione della resistenza a compressione*. 2015. [Online]. Available: <http://store.uni.com/catalogo/uni-en-772-1-2015>
- [154] UNI, UNI EN 1926:2007 - *Natural stone test methods - Determination of uniaxial compressive strength*. 2007. Accessed: Apr. 27, 2023. [Online]. Available: <https://store.uni.com/en/uni-en-1926-2007>
- [155] UNI EN 15758 *Conservazione dei Beni Culturali - Procedure e strumenti per misurare la temperatura dell'aria e quella della superficie degli oggetti*. 2010. [Online]. Available: <http://store.uni.com/catalogo/uni-en-15758-2010>
- [156] UNI EN 16242 *Conservazione dei beni culturali - Procedure e strumenti per misurare l'umidità dell'aria e gli scambi di vapore tra l'aria e i beni culturali*. 2013. [Online]. Available: <http://store.uni.com/catalogo/uni-en-16242-2013>
- [157] A. Tavukçuoğlu and E. Grinzato, "Determination of critical moisture content in porous materials by IR thermography," *Quantitative InfraRed Thermography Journal*, vol. 3, no. 2, pp. 231–245, Dec. 2006, doi: 10.3166/qirt.3.231-245.
- [158] "Storia del Lazzaretto Nuovo," Lazzaretti Veneziani. Accessed: Jul. 03, 2023. [Online]. Available: <https://lazzarettiveneziani.it/it/i-lazzaretti/storia-del-lazzaretto-nuovo>
- [159] M. Krus, *Moisture Transport and Storage Coefficients of Porous Mineral Building Materials*, III. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 1996.
- [160] H. M. Kunzel, *Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components*. Fraunhofer Institute for Building Physics, 1995.
- [161] Department of Hygrothermics at Fraunhofer IBP, "WUFI (en)," WUFI®. [Online]. Available: <https://wufi.de/en/>
- [162] H. M. Kunzel and K. Kiessl, "Calculation of heat and moisture transfer in exposed building components," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 40, no. 1, pp. 159–167, Jan. 1997.

- [163] M. Karoglou, A. Moropoulou, M. K. Krokida, and Z. B. Maroulis, "A powerful simulator for moisture transfer in buildings," *Building and Environment*, vol. 42, no. 2, pp. 902–912, Feb. 2007, doi: 10.1016/j.buildenv.2005.10.008.
- [164] A. Holm and H. Kunzel, "Two-dimensional transient heat and moisture simulations of rising damp with WUFI 2d," presented at the 12th IB2MaC, Madrid, Spain, Jun. 2000, pp. 1–8.
- [165] National Renewable Energy Laboratory (NREL), "EnergyPlus," EnergyPlus. [Online]. Available: <https://energyplus.net/weather>
- [166] UNI EN ISO 15927-4:2005 *Hygrothermal performance of buildings - Calculation and presentation of climatic data - Part 4: Hourly data for assessing the annual energy use for heating and cooling*. 2005.
- [167] UNI Ente Italiano di Normazione, *UNI EN ISO 6946:2018 - Building components and building elements - Thermal resistance and thermal transmittance - Calculation methods*. 2018. Accessed: Jul. 05, 2023. [Online]. Available: <https://store.uni.com/uni-en-iso-6946-2018>
- [168] M. I. M. Torres and V. P. de Freitas, "Modelling of rising damp in historical buildings," *Historical Construction*, pp. 381–390, 2001.
- [169] M. I. Torres and V. P. de Freitas, "Materials of the walls affecting the base ventilation," *Int. Journal for Housing Science*, vol. 34, no. 3, pp. 163–174, 2010.
- [170] I. M. Torres, "Wall base ventilation system to treat rising damp: The influence of the size of the channels," *Journal of Cultural Heritage*, vol. 15, no. 2, pp. 121–127, Mar. 2014, doi: 10.1016/j.culher.2013.03.005.
- [171] A. S. Guimarães and V. P. de Freitas, "Wall base ventilation system as a new technique to treat rising damp in existent buildings," *J Build Apprais*, vol. 5, no. 2, pp. 187–195, Oct. 2009, doi: 10.1057/jba.2009.29.
- [172] A. S. Guimarães, J. M. P. Q. Delgado, and V. P. de Freitas, "Mathematical analysis of the evaporative process of a new technological treatment of rising damp in historic buildings," *Building and Environment*, vol. 45, no. 11, pp. 2414–2420, Nov. 2010, doi: 10.1016/j.buildenv.2010.05.007.
- [173] A. S. Guimarães, "Degradation Control of Walls with Rising Damp Problems: Numerical and Mathematical Analysis of the Evaporative Process," presented at the International Conference on Durability of Building Materials and Components, Porto, Portugal, Apr. 2011, p. 8.
- [174] A. S. Guimarães, J. M. P. Q. Delgado, and V. P. de Freitas, "Rising Damp: Optimization of the Wall Base Ventilation System," *Defect and Diffusion Forum*, vol. 353, pp. 311–316, 2014, doi: 10.4028/www.scientific.net/DDF.353.311.
- [175] A. S. Guimarães, J. M. P. Q. Delgado, and V. P. de Freitas, "Treatment of rising damp in historic buildings: Experimental campaign of wall base ventilation and interface effect analysis," *Journal of Cultural Heritage*, vol. 20, pp. 733–738, Jul. 2016, doi: 10.1016/j.culher.2016.02.012.
- [176] R. Burkinshaw, "The rising damp tests of Camberwell Pier: Potential height of moisture rise in brickwork and the effectiveness of a modern chemical injection cream damp coursing application," *J Build Apprais*, vol. 6, no. 1, pp. 5–19, Jun. 2010, doi: 10.1057/jba.2010.13.
- [177] E. Rirsch, J. MacMullen, and Z. Zhang, "Evaluation of mortar samples obtained from UK houses treated for rising damp," *Construction and Building Materials*, vol. 25, no. 6, pp. 2845–2850, Jun. 2011, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2010.12.050.
- [178] E. Gabrielli, F. Grüner, and C. Colla, "Evaluation of damage evolution in masonry due to environmental parameters and salt capillary rise," presented at the 15th International Brick and Block Masonry Conference, Florianópolis – Brazil, 2012.
- [179] C. Colla, P. Baldracchi, A. Troi, F. Ubertini, and R. Carli, "Simulation and test procedures to correlate structural damage with moisture & salts migration in masonry," p. 6.
- [180] L. Falchi, E. Zendri, E. Capovilla, P. Romagnoni, and M. De Bei, "The behaviour of water-repellent mortars with regards to salt crystallization: from mortar specimens to masonry/render systems," *Materials and Structures*, vol. 66, no. 50, pp. 1–15, Aug. 2016, doi: 10.1617/s11527-016-0891-8.

- [181] A. Sardella, P. De Nuntiis, C. Giosuè, F. Tittarelli, and A. Bonazza, "Diagnosis and methods against rising damp in industrial heritage buildings: a case study in Italy," presented at the IMEKO International Conference on Metrology for Archaeology and Cultural Heritage, Lecce, Italy, Apr. 2018, pp. 202–207.
- [182] A. Sardella, P. De Nuntiis, and A. Bonazza, "Efficiency evaluation of treatments against rising damp by scale models and test in situ," *Journal of Cultural Heritage*, vol. 31, pp. S30–S37, Jun. 2018, doi: 10.1016/j.culher.2018.03.020.
- [183] Y. Li, X. Dang, C. Xia, Y. Ma, D. Ogura, and S. Hokoi, "The Effect of Air leakage through the Air Cavities of Building Walls on Mold Growth Risks," *Energies*, vol. 13, no. 5, Art. no. 5, Jan. 2020, doi: 10.3390/en13051177.
- [184] A. Hacquebord, B. Lubelli, R. van Hees, and T. Nijland, "Evaluation of Spreading and Effectiveness of Injection Products against Rising Damp in Mortar/Brick Combinations," *Procedia Chemistry*, vol. 8, pp. 139–149, Jan. 2013, doi: 10.1016/j.proche.2013.03.019.
- [185] R. J. G. de Freitas, "FCNAUP - Técnicas de Tratamento / Controlo da Humidade Ascensional - Catálogo," FEUP - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2014. Accessed: Jun. 15, 2023. [Online]. Available: [https://sigarra.up.pt/fcnaup/pt/pub\\_geral.pub\\_view?pi\\_pub\\_base\\_id=32119](https://sigarra.up.pt/fcnaup/pt/pub_geral.pub_view?pi_pub_base_id=32119)
- [186] A. Stazi, G. Moriconi, M. D'Orazio, and M. Capozucca, "Fattori di crisi e limiti di impiego di intonaci traspiranti," in *Atti del Convegno Internazionale*, Bari: Consiglio Nazionale delle Ricerche - Progetto Finalizzato Edilizia, Oct. 1996, pp. 207–230.
- [187] L. M. Ottosen and I. Rørig-Dalgaard, "Drying brick masonry by electro-osmosis," in *"Masonry (10)", Proceedings of the Seventh International Masonry Conference*, London: British Masonry Society, 2006.
- [188] L. M. Ottosen, A. J. Pedersen, and I. Rørig-Dalgaard, "Salt-related problems in brick masonry and electrokinetic removal of salts," *J Build Apprais*, vol. 3, no. 3, pp. 181–194, Sep. 2007, doi: 10.1057/palgrave.jba.2950074.
- [189] L. Ottosen, I. Rørig-Dalgaard, and A. Villumsen, "Electrochemical removal of salts from masonry – Experiences from pilot scale," presented at the Salt Weathering on Buildings and Stone Sculptures - SWBSS 2008, Copenhagen, Denmark, Oct. 2008.
- [190] O. Matyščík and M. Novotný, "Experimental drying and desalination of bricks, sandstones and masonry under an applied electric field," Brno University Of Technology, Brno, 2014.
- [191] B. Lubelli, R. P. J. van Hees, L. Miedema, M. Fugazzotto, A. Sardella, and A. Bonazza, "'Electro-physical' methods to stop rising damp. Assessment of the effectiveness in two case studies," in *International RILEM Conference on Materials, Systems and Structures in Civil Engineering*, Lyngby, Denmark, Aug. 2016, pp. 195–204.
- [192] S. Godts, H. Clercq, and R. Hayen, "Poulticing vs electrophoresis desalination of historic masonry, The case of the mill at Hoksem," presented at the The International RILEM Conference Materials, Systems and Structures in Civil Engineering 2016, Technical University of Denmark, Lyngby: RILEM Publications S.A.R.L. Authors:, Jan. 2016.



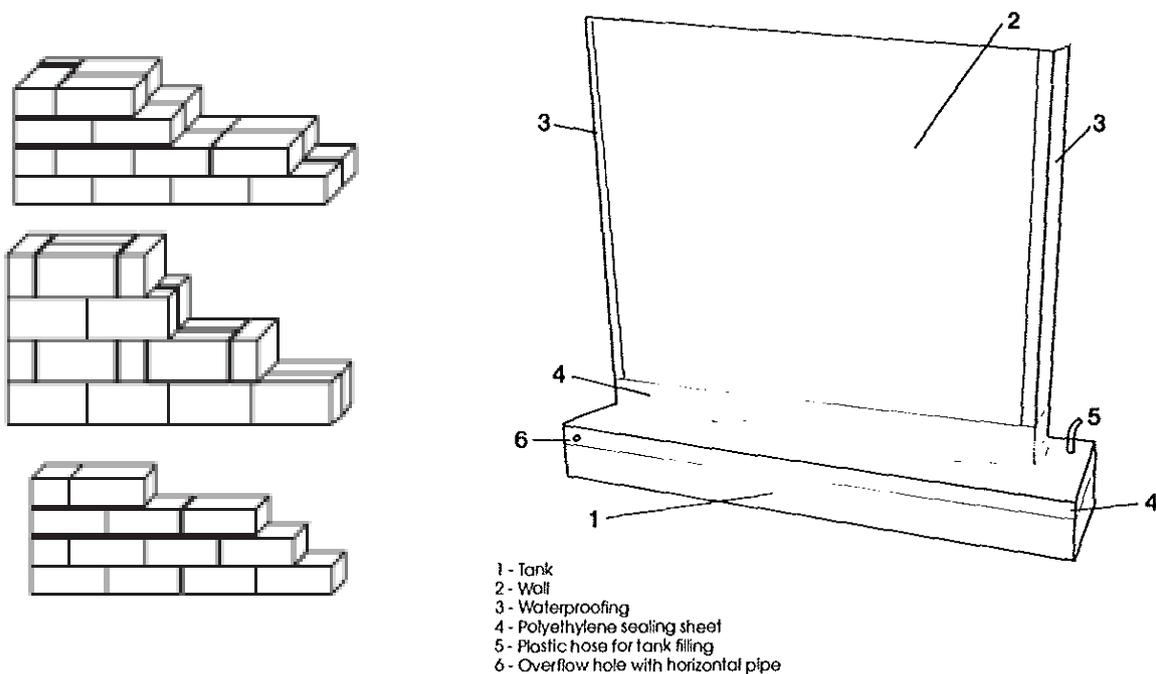
## Appendice A

### Test modelli in muratura a scala reale – stato dell’arte

Negli ultimi 20-30 anni sono state eseguite alcune sperimentazioni su modelli fisici di muratura a scala reale in laboratorio (in condizioni di temperatura e umidità controllate) e/o in situ (ambiente esterno non controllato), in tutto il mondo. Tali test sono utili alla diagnosi per la presenza di umidità da risalita capillare, ottenendo indicazioni per differenti tecnologie costruttive e valutando l’efficacia dei sistemi di trattamento (per evaporazione, assorbimento o trattamenti elettrocinetici) attualmente esistenti nel mercato.

Tali sperimentazioni hanno avuto lo scopo di utilizzare differenti sistemi e strumenti di monitoraggio sui modelli, per analizzare e stimare l’efficacia e la precisione degli stessi.

Di seguito si riportano nel dettaglio alcune delle ricerche ritenute propedeutiche alla sperimentazione riportata al § 5, con informazioni relativamente i materiali costruttivi utilizzati, le dimensioni del campione, le condizioni ambientali, i monitoraggi eseguiti e le relative tempistiche di acquisizione dei dati.



*Rappresentazione modelli di muratura in laboratorio e differente giunzione dei blocchi in tufo*

<b>Dimensioni modello</b>	L. 200 cm, H. 240 cm, Sp. 35/55 cm (n. 12 pareti in tufo) L. 200 cm, H. 250 cm, Sp. 25 cm (n. 8 pareti in argilla)
<b>Materiali</b>	Tufo (blocco 17 x 24 x 48 cm); mattone di argilla (12 x 5.5 x 25 cm) Malta idraulica cementizia ( $\sigma = 5 \text{ N/mm}^2$ ) Intonaco (sp. 1.5 cm, in quattro strati con porosità crescente verso l'esterno) Membrana bituminosa (impermeabilizzazione laterale)
<b>Condizioni ambientali</b>	Ambiente chiuso non climatizzato Vasche di ferro zincato (230 x 60-70 x 25 cm), sigillate con film PE
<b>Monitoraggi</b>	Microclima (T-RH- $P_v$ aria) T superficiale (termocoppie in rame-costantana)
<b>Tempo acquisizione</b>	12 mesi
<b>Sintesi risultati</b>	Valori di output variabili stagionalmente

Torres M.I.M. et al. (2001, 2007, 2010, 2014, 2018)[1], [22], [168], [169], [170], Guimarães A.S et al. (2009, 2010, 2011, 2012, 2014, 2016)[171], [172], [173], [174], [175], Delgado J.M.P.Q. et al. (2016)[35]



*Modelli di muratura in laboratorio con dispositivo di ventilazione meccanica controllata (sopra) e sonde di monitoraggio (sotto)*

<b>Dimensioni modello</b>	L. 158 cm, H. 200 cm, Sp. 20 cm
<b>Materiali</b>	Blocchi di calcare (30 x 20 x 20 cm) Malta di calce Piastrille Sabbia (alla base della muratura)
<b>Condizioni ambientali</b>	Ambiente chiuso climatizzato
<b>Monitoraggi</b>	T-RH (profondità 5-10 cm; 12 livelli di misura) Simulazione dinamica igrometrica (WUFI 2D)
<b>Tempo acquisizione</b>	2 mesi
<b>Sintesi risultati</b>	Risalita capillare in muratura a vista, 60 cm Risalita capillare in muratura rivestita con piastrelle, 90 cm



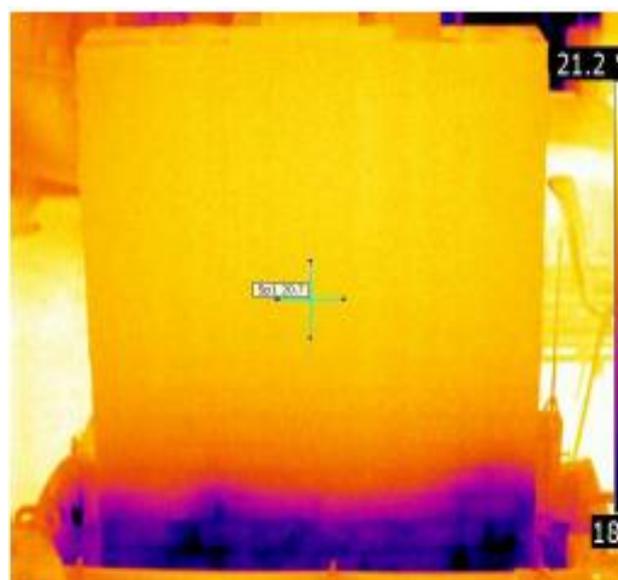
*Modello di pilastro in mattoni in laboratorio (sinistra) e applicazione della barriera chimica (destra)*

<b>Dimensioni modello</b>	Pilastro (Camberwell Pier)
<b>Materiali</b>	Mattone di argilla (12 x 5.5 x 25) Malta di sabbia e calce idraulica
<b>Condizioni ambientali</b>	Ambiente chiuso non climatizzato
<b>Monitoraggi</b>	Microclima (T-RH) Misure capacitive/resistive (differenti altezze) Record Equilibrium Relative Humidity (ERH), T superficiale H. risalita capillare
<b>Tempo acquisizione</b>	55 giorni
<b>Sintesi risultati</b>	Risalita capillare 60 cm



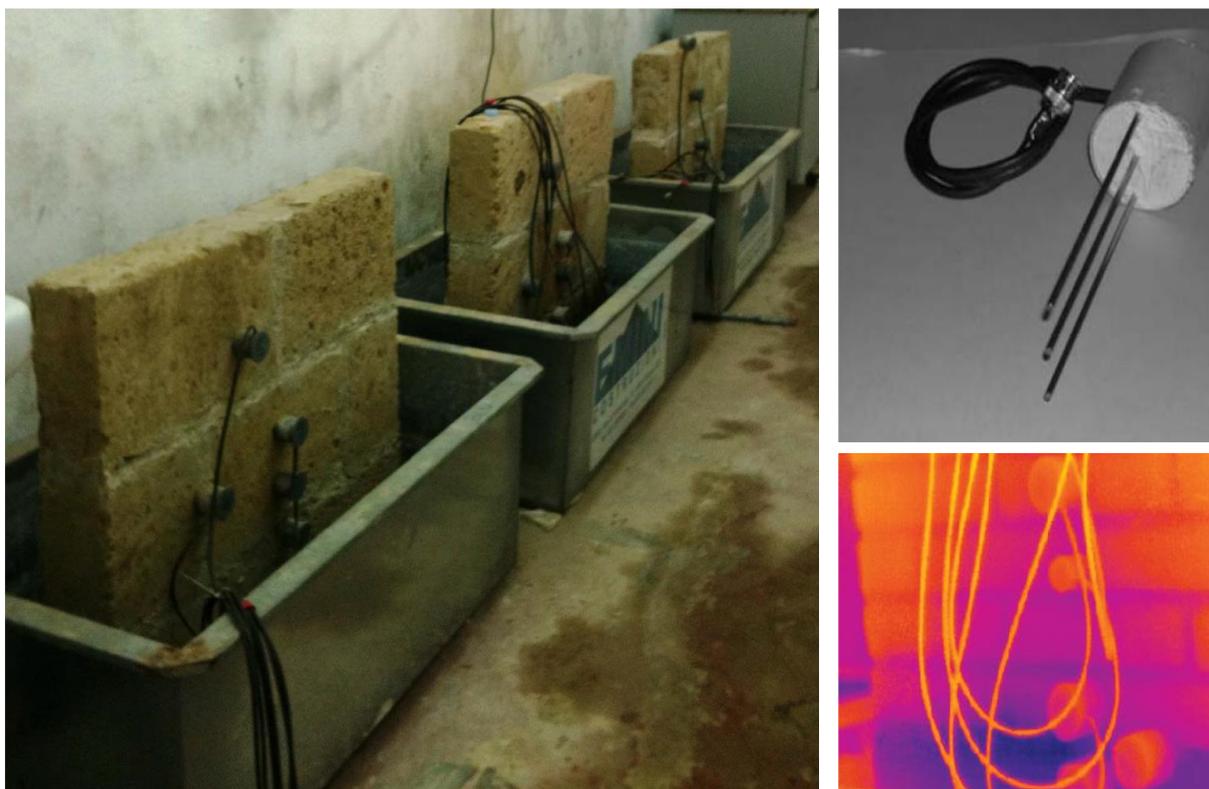
*Modello di muratura in laboratorio con posizionamento sonde di monitoraggio*

<b>Dimensioni modello</b>	L. 120 cm, H. 100 cm (n. 2 pareti)
<b>Materiali</b>	Mattoni di argilla Malta di cemento Portland e sabbia (rapporto 1:5); malta storica con argilla in polvere e sabbia (rapporto 1:1:6).
<b>Condizioni ambientali</b>	Ambiente chiuso climatizzato
<b>Monitoraggi</b>	Metodo capacitivo/resistivo MC% - metodo gravimetrico Microclima (T-RH)
<b>Tempo acquisizione</b>	12 mesi
<b>Sintesi risultati</b>	MC% con malta permeabile = 15-20%; malta poco permeabile = 1-3% Efflorescenze saline



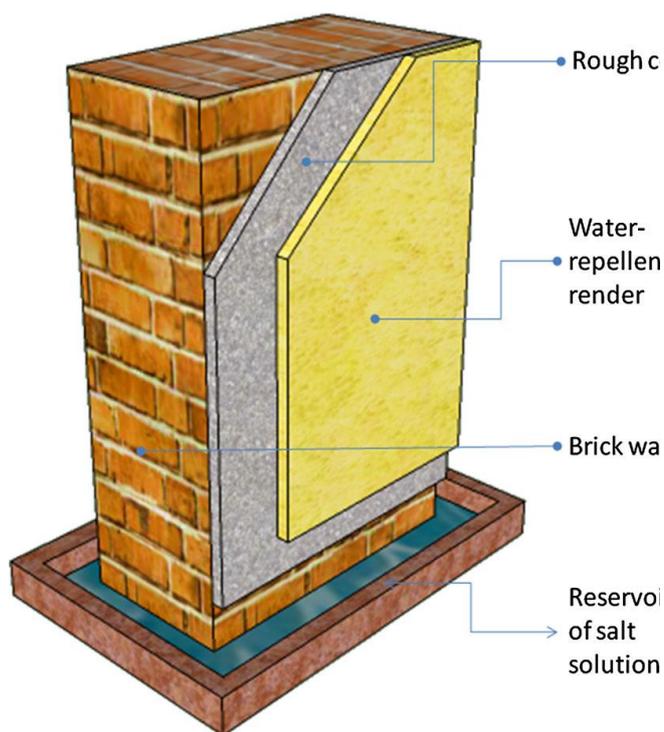
Modello di muratura in ambiente esterno e monitoraggio mediante termografia IR (destra)

<b>Dimensioni modello</b>	L. 130 cm, H. 130 cm, Sp. 25 cm (n. 2 pareti nuove) L. 130 cm, H. 100 cm, Sp. 25 cm (n. 12 pareti storiche)
<b>Materiali</b>	Mattoni di argilla (12 x 5.5 x 25 cm); pietra; calcestruzzo Malta idraulica
<b>Condizioni ambientali</b>	Ambiente esterno/interno controllato (T = 20-60°C, RH = 20-50-75%) Vasche di acciaio rivestite con foglio impermeabile Immersione in salamoia (solfato e cloruro di sodio)
<b>Monitoraggi</b>	Microonde MC% - metodo gravimetrico (2 profondità) Termografia IR
<b>Tempo acquisizione</b>	6 mesi
<b>Sintesi risultati</b>	Altezza di risalita capillare variabile in base a esposizione solare Formazioni di deposizioni saline e distacchi

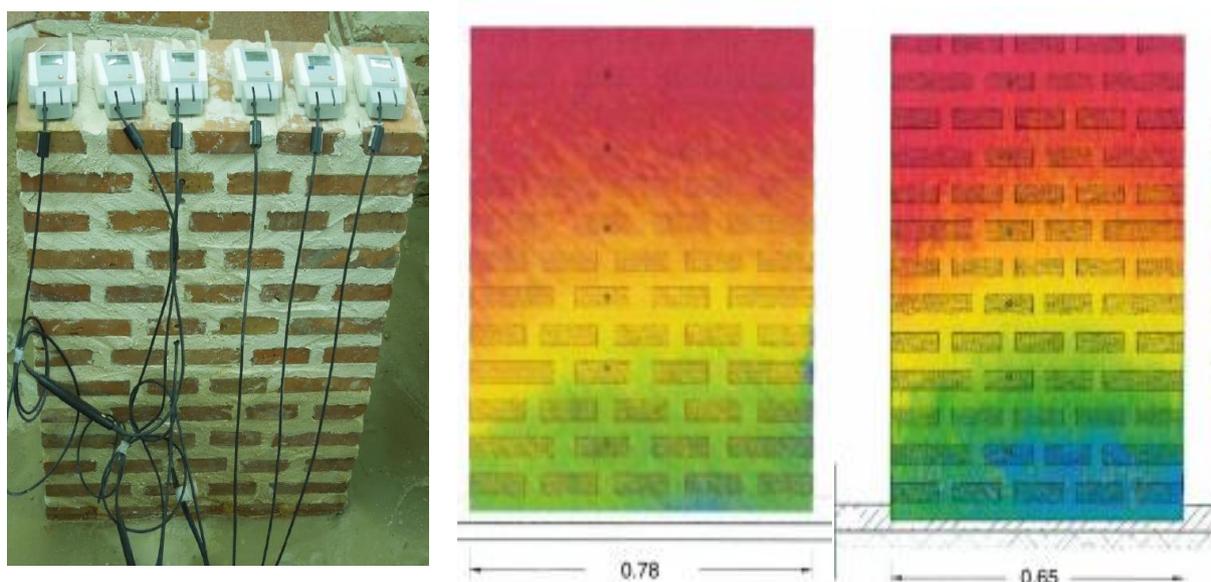


Modelli di muratura in tufo in laboratorio (a sinistra) e sistemi di monitoraggio utilizzati (a destra): sopra, sonda TDR; sotto, immagine termografica IR

<b>Dimensioni modello</b>	H. 120 cm (n. 3 pareti) H. 110-120 cm (n. 3 pareti)
<b>Materiali</b>	Tufo giallo (blocco 12.5 x 7 x 5.5 cm); tufo giallo vulcanico (blocco 10 x 24 x 38 cm) Malta cementizia tradizionale / premiscelata Asfalto (rivestimento laterale) Sabbia (alla base della muratura)
<b>Condizioni ambientali</b>	Ambiente chiuso climatizzato (T = 18-20°C, RH = 70%). Serbatoi di acciaio (100 x 50 x 40 cm) / legno (190 x 160 cm) + fogli di plastica
<b>Monitoraggi</b>	TDR e GPR (n. 3 sonde per ogni parete, L. 10.5 cm, H. 15-32-60 cm, Ø 0.15 cm, interasse 0.3 cm)
<b>Tempo acquisizione</b>	2 mesi
<b>Sintesi risultati</b>	Malta tradizionale ( $\varphi = 50\%$ ) minore assorbimento d'acqua ma velocità di risalita elevata; malta premiscelata ( $\varphi = 35\%$ ) elevato contenuto d'acqua MC = 37% (H. 15 cm)



<b>Dimensioni modello</b>	L. 50 cm, H. 75 cm, Sp. 25 cm (n. 2 pareti)
<b>Materiali</b>	Mattoni di argilla (12 x 5.5 x 25 cm) Malta di calce idraulica naturale e pozzolana ultrafine (rapporto 1:1) Intonaco di malta calce-cemento (sp. < 1 cm)
<b>Condizioni ambientali</b>	Ambiente chiuso climatizzato (T = 20±2°C, RH = 90±5%) Serbatoi di plastica (65 x 35 x 10 cm) Immersione in soluzione di solfati di sodio
<b>Monitoraggi</b>	H. risalita capillare Metodo conduttimetrico (quantità di Sali solubili) Termografia IR
<b>Tempo acquisizione</b>	6 mesi
<b>Sintesi risultati</b>	Formazione di efflorescenze superficiali e variazione colore superficiale Aumento della conduttività nelle aree inferiori Diminuzione della resistenza meccanica nelle malte (principalmente in quelle a base di calce idraulica)



Modello di muratura con sonde per il contenuto di umidità (sinistra) e immagini IR muratura con mattoni di recupero (in centro) e mattoni nuovi (a destra)

<b>Dimensioni modello</b>	L. 78 cm, H. 100 cm, Sp. 28 cm (n. 2 pareti in mattoni di recupero) L. 65 cm, H. 100 cm, Sp. 24 cm (n. 2 pareti in mattoni nuovi)
<b>Materiali</b>	Mattone di argilla nuovo / di recupero Sabbia (sp. 5 cm, alla base della muratura) + foglio impermeabile
<b>Condizioni ambientali</b>	Ambiente chiuso climatizzato (T = 19-21°C, RH = 45-55%)
<b>Monitoraggi</b>	Microclima (T-RH) MC% mattoni/malta – metodo gravimetrico T/RH superficiale (n. 6 punti) + in profondità (n. 6 punti, Ø 8 mm)
<b>Tempo acquisizione</b>	12 mesi
<b>Sintesi risultati</b>	Risalita capillare 50-60 cm



*Modelli di muratura con blocchi in calcestruzzo a vista (sinistra) e con rivestimento impermeabile (a destra)*

<b>Dimensioni modello</b>	L. 200 cm, H. 210 cm, Sp. 25-35-55 cm (n. 14 pareti)
<b>Materiali</b>	Calcestruzzo (blocco 11.5 x 22.5 x 46 cm) Intonaco di sabbia-cemento (sp. 13 mm, in più strati)
<b>Condizioni ambientali</b>	Ambiente esterno
<b>Monitoraggi</b>	Altezza risalita capillare MC% – metodo gravimetrico (profondità 0-25 mm, 25-50 mm e 50-75 mm)
<b>Tempo acquisizione</b>	10 mesi
<b>Sintesi risultati</b>	Risalita capillare variabile stagionalmente



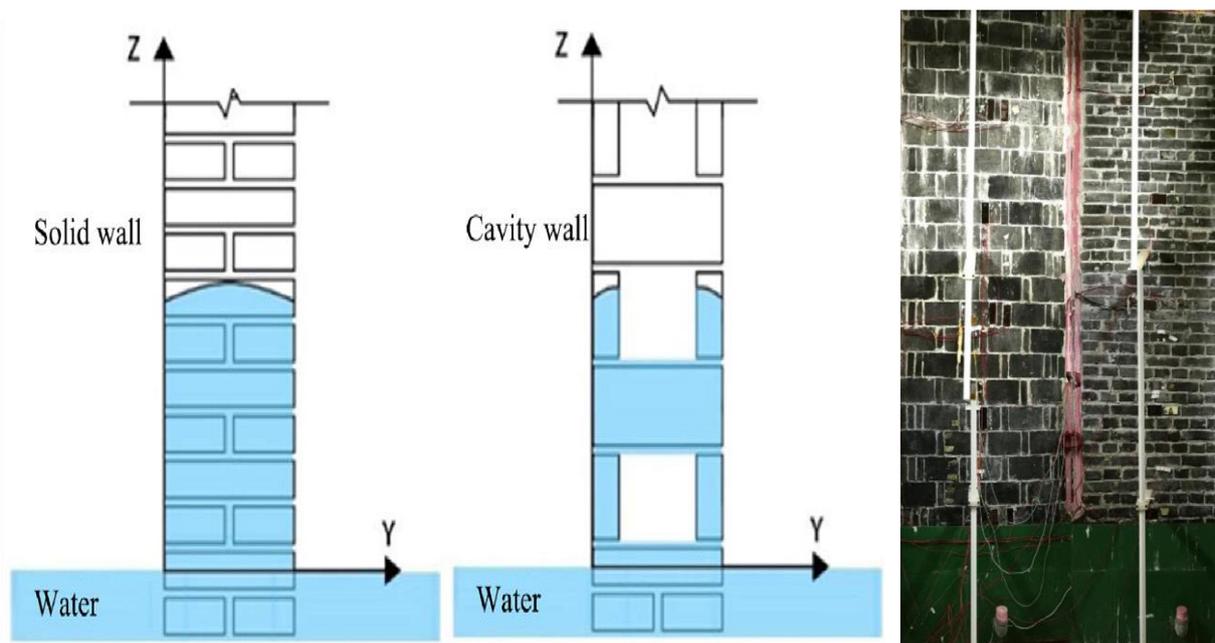
*Apparato di monitoraggio della risalita capillare (sinistra) e sistema resistivo in profondità (destra)*

<b>Dimensioni modello</b>	n. 5 pareti edificio inglese (piano terra)
<b>Materiali</b>	Mattoni
<b>Condizioni ambientali</b>	--
<b>Monitoraggi</b>	Metodo capacitivo/resistivo (H. 50-150-225-300-450-600-750 mm, Ø 10 mm, profondità 40 mm)
<b>Tempo acquisizione</b>	15 mesi
<b>Sintesi risultati</b>	Risalita capillare di 25-80 cm (variabile)



Muratura reale analizzata in situ (sinistra) e monitoraggio gravimetrico su modello di muratura

<b>Dimensioni modello</b>	L. 77 cm, H. 100 cm, Sp. 25 cm (n. 4 pareti) Sp. 50-80 cm (muratura reale presso Zuccherificio di Ferrara)
<b>Materiali</b>	Mattoni "San Marco" (12 x 5.5 x 25 cm) Malta bastarda calce-cemento
<b>Condizioni ambientali</b>	Ambiente esterno Immersione in soluzione salina (H <sub>2</sub> O + 5% NaCl)
<b>Monitoraggi</b>	MC% - metodo gravimetrico
<b>Tempo acquisizione</b>	20 mesi
<b>Sintesi risultati</b>	MC% elevato alla base della muratura (H. 18 cm)



<b>Dimensioni modello</b>	L. 120 cm, H. 300 cm, Sp. 24 cm (n. 1 parete piena) L. 120 cm, H. 300 cm, Sp. 24 cm (n. 1 parete con intercapedine)
<b>Materiali</b>	Mattone di argilla blu (24 x 11.2 x 4.8 cm) Malta di calce (Sp. giunto 8 mm, sabbia silicea + calce + H <sub>2</sub> O - 3:1:2)
<b>Condizioni ambientali</b>	Ambiente interno climatizzato (T ± 0.3°C, RH ± 0.5%) Vasche in acciaio (60 x 50 cm)
<b>Monitoraggi</b>	Microonde Metodo resistivo Termografia IR
<b>Tempo acquisizione</b>	20 mesi
<b>Sintesi risultati</b>	Muro pieno: H. risalita capillare = 168 cm; MC% = 12-14.5% Muro con intercapedine: H. risalita capillare = 192 cm; MC% = 8-14.5% Valori di output influenzati dalle condizioni al contorno



## Appendice B

### Tecniche di trattamento – test di applicazione

Di seguito sono riportate una serie di schede sintetiche che vogliono esaminare le diverse tecniche di trattamento diffuse contro l'umidità di risalita, comprendono tecniche che hanno lo scopo di (i) bloccare, (ii) limitare l'ingresso di acqua capillare agendo direttamente sulle cause o (iii) agire sui sintomi della risalita.

In tempi recenti è stata sviluppata una moltitudine di sistemi basati sull'applicazione di campi elettrici o magnetici, che potenzialmente risultano meno impattanti da un punto di vista conservativo. Qualsiasi sia il sistema di intervento è fondamentale definire la sua compatibilità con il paramento murario interessato, soprattutto in edifici con valenza storico-artistica, per verificare che non provochi alcun danno (tecnico o estetico) alla fabbrica.

Dal grafico in Figura 98 si può notare l'elevata diffusione di studi principalmente su dispositivi di origine elettromagnetica (e varianti) e in secondo luogo vengono analizzate barriere chimiche e sistemi di ventilazione meccanica. L'utilizzo degli intonaci macro-porosi come sistema di limitazione della risalita capillare si sta lentamente abbandonando, in quanto il metodo in sé non è efficace, ma solo come applicazione di supporto ad altre tecniche. Anche l'analisi delle barriere meccaniche si sta via via trascurando, in quanto il metodo non può essere applicato su edifici di carattere storico-culturale e su aree con elevato rischio sismico.

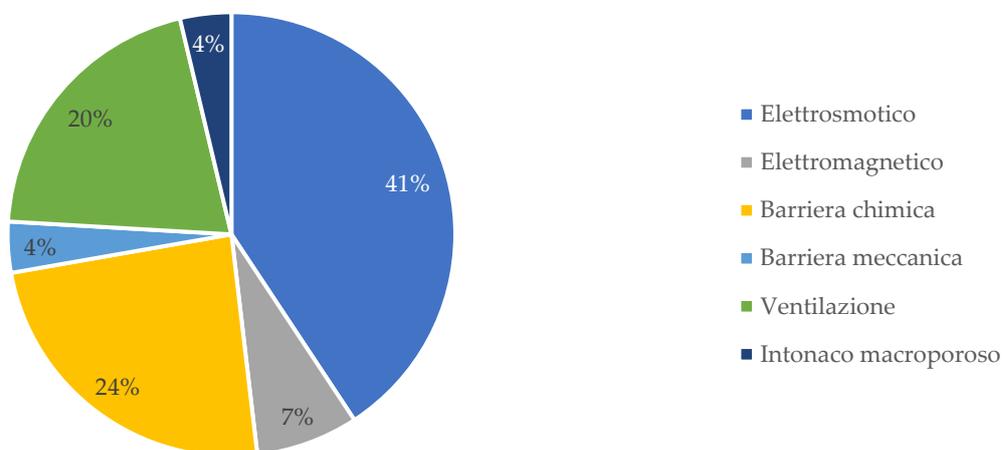
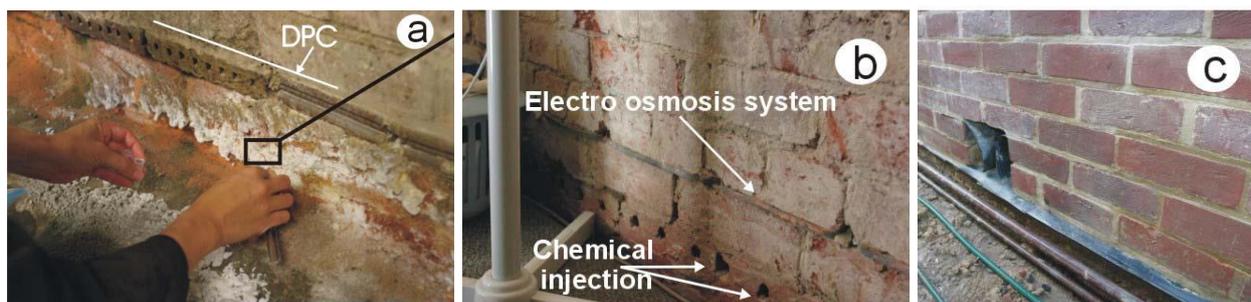


Figura 98. Sistemi di trattamento dell'umidità da risalita capillare in laboratorio (modelli) o in situ (caso reale).



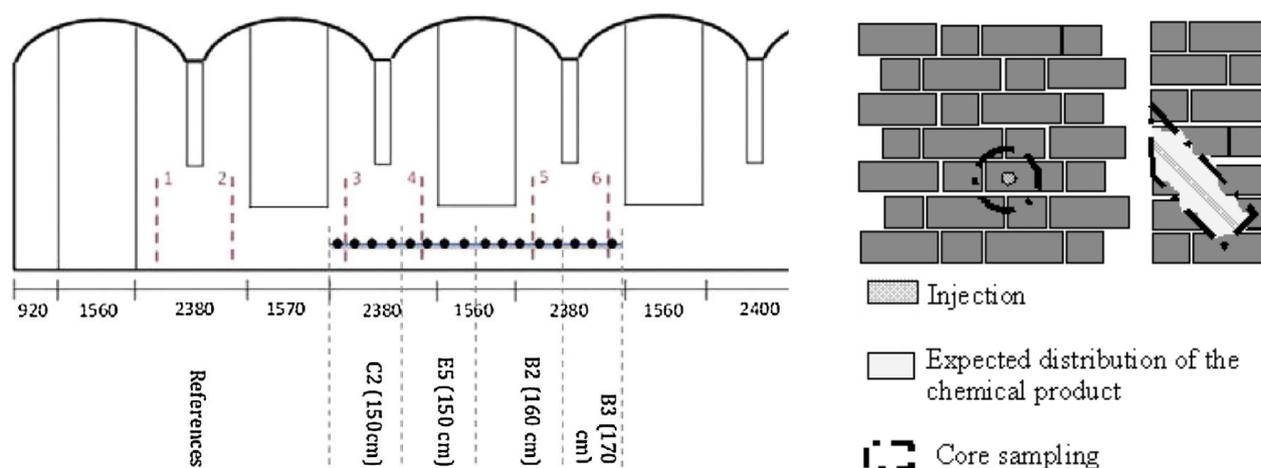
<b>Sistema di trattamento</b>	Barriera meccanica
<b>Condizioni ambientali</b>	Edificio con ambiente interno climatizzato (Serbia)
<b>Tecnologia costruttiva</b>	Scuola (1892) con muratura in mattoni (29 x 14 x 6.5 cm, $\varphi = 4.7-21.2\%$ , $\rho = 1310-1667 \text{ kg/m}^3$ )
<b>Monitoraggi</b>	MC% - metodo gravimetrico
<b>Tempo acquisizione</b>	--
<b>Sintesi risultati</b>	Diminuzione efflorescenze saline superficiali

Alfano G. et al. (2006)[14]	
<b>Sistema di trattamento</b>	Barriera meccanica Barriera chimica (silanica/silossanica)
<b>Condizioni ambientali</b>	Ambiente interno climatizzato
<b>Tecnologia costruttiva</b>	Modello di muratura (n. 20 pareti, L. 200 cm, H. 240 cm, Sp. 25-35-55 cm) Tufo / mattone di argilla, malta in calce-cemento, intonaco (Sp. 1.5 cm) Bitume per rivestimento facce laterali
<b>Monitoraggi</b>	T-RH interna/esterna, T superficiale MC% - metodo gravimetrico
<b>Tempo acquisizione</b>	12 anni
<b>Sintesi risultati</b>	Barriera meccanica efficace per riduzione risalita capillare Barriera chimica: poco efficace con prodotti silossanici, molto efficace con prodotti silanici



(a) barriera chimica, (b) elettrosmosi attiva + barriera chimica, (c) barriera meccanica

<b>Sistema di trattamento</b>	Barriera meccanica (mattoni vetrificati, fogli catrame + sabbia, fogli catrame + calcite, film PE) Barriera chimica per impregnazione Elettrosmosi
<b>Condizioni ambientali</b>	Edifici vari con ambiente interno climatizzato/non climatizzato (Australia)
<b>Tecnologia costruttiva</b>	Differenti tecnologie costruttive/epoche di realizzazione Malta di calce ( $\varphi = 20\%$ ), mattone, argillite ( $\varphi = 9.3\%$ ), calcare, arenaria
<b>Monitoraggi</b>	X-ray diffraction (composizione) Cromatografia ionica (distribuzione salina) Environmental Scanning Electron Microscopy (morfologia dei cristalli)
<b>Tempo acquisizione</b>	--
<b>Sintesi risultati</b>	Elevata presenza di Sali, in particolare nelle malte, seguite dai mattoni e pietre I sistemi di trattamento applicati (tra il 1970 e il 2005 circa) non hanno registrato alcun effetto contro la risalita capillare nel lungo periodo, correlati a cedimenti dei sistemi, una costante alimentazione di risalita capillare e Sali e scarsa manutenzione degli edifici



Schema dei pannelli murari con indicazione punti di prelievo per prova gravimetrica e punti di trattamento delle pareti mediante iniezione (C2=siliconato, B2-B3=silossano, E5=silano); a destra, schema iniezioni barriera chimica

<b>Sistema di trattamento</b>	Barriera chimica (idrorepellenti liquidi come silossani/silossani/siliconati, creme silossani-siliconati, iniezione a bassa pressione; Ø foro 14-25 mm, interasse 12 cm, profondità 55 cm, L. 150-170 cm, H. 40-70 cm, angolo 15-40°)
<b>Condizioni ambientali</b>	Edificio con ambiente interno non climatizzato (Belgio)
<b>Tecnologia costruttiva</b>	Muratura perimetrale (sp. 60 cm) in mattoni di argilla ( $\varphi = 29\%$ , $CA = 397 \text{ g/m}^2\sqrt{s}$ ) + malta calce-cemento
<b>Monitoraggi</b>	MC% e HMC% - metodo gravimetrico (Ø foro 10 cm, profondità fino a 50 cm) Contenuto salino
<b>Tempo acquisizione</b>	29 mesi
<b>Sintesi risultati</b>	Sali presenti principalmente in superficie (0-5 cm) fino a H. 2 m MC% più elevato nella muratura in basso (linea di demarcazione wet-dry H. 1 m) Barriera chimica non limita in maniera uniforme il livello di risalita capillare (maggiori diminuzioni in corrispondenza dei fori)



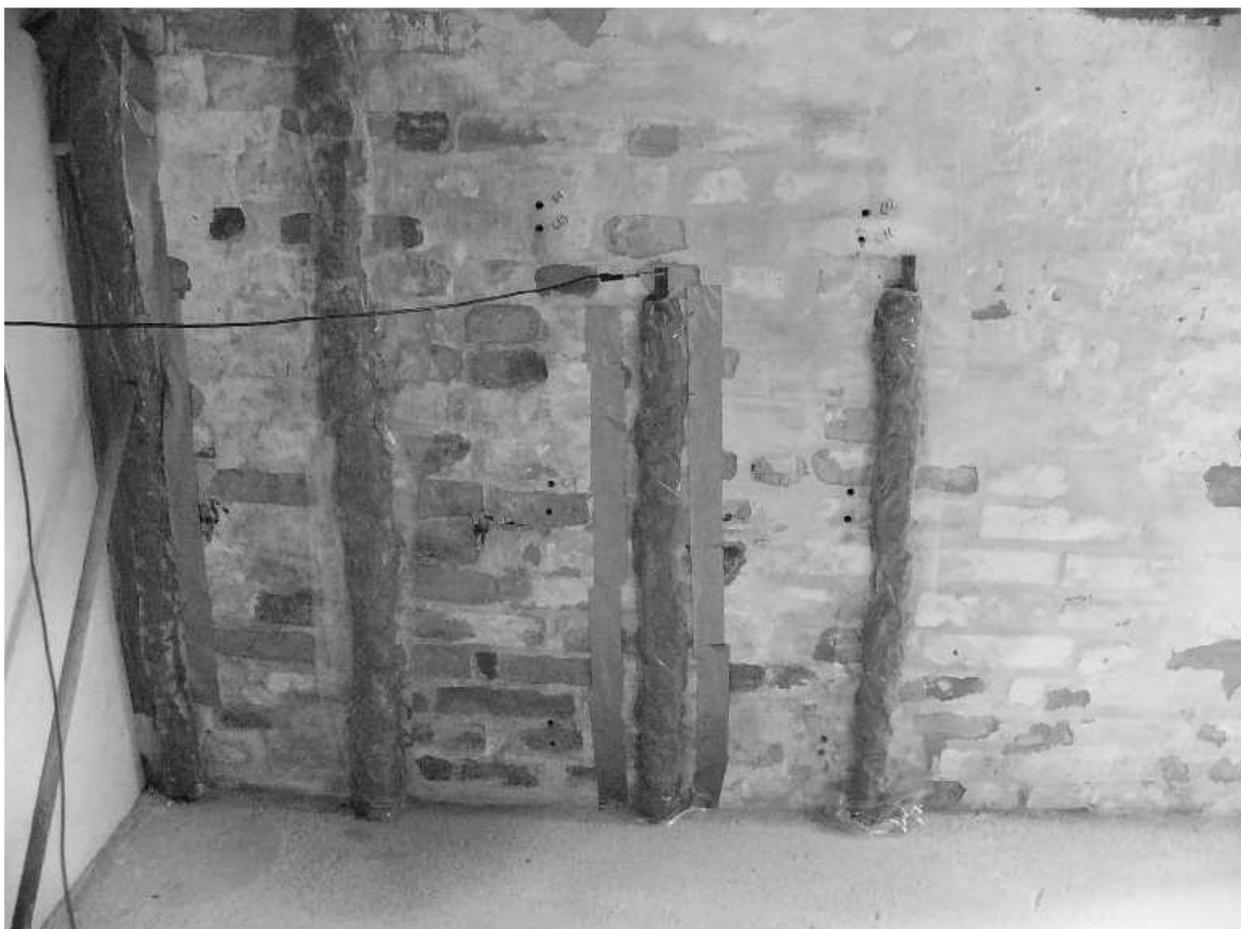
<b>Sistema di trattamento</b>	Barriera chimica (iniezione resine a $P = 0.10-0.20 \text{ daN/cm}^2$ , $\varnothing$ tubo 12 mm, interasse 12 cm, H. 100-150 cm) Ventilazione meccanica (fondazione, distanza 30 cm)
<b>Condizioni ambientali</b>	Edificio con ambiente interno non climatizzato (Romania)
<b>Tecnologia costruttiva</b>	Muratura (sp. 40-80 cm) in mattoni
<b>Monitoraggi</b>	--
<b>Tempo acquisizione</b>	--
<b>Sintesi risultati</b>	Riduzione risalita capillare (< 140-160 cm)



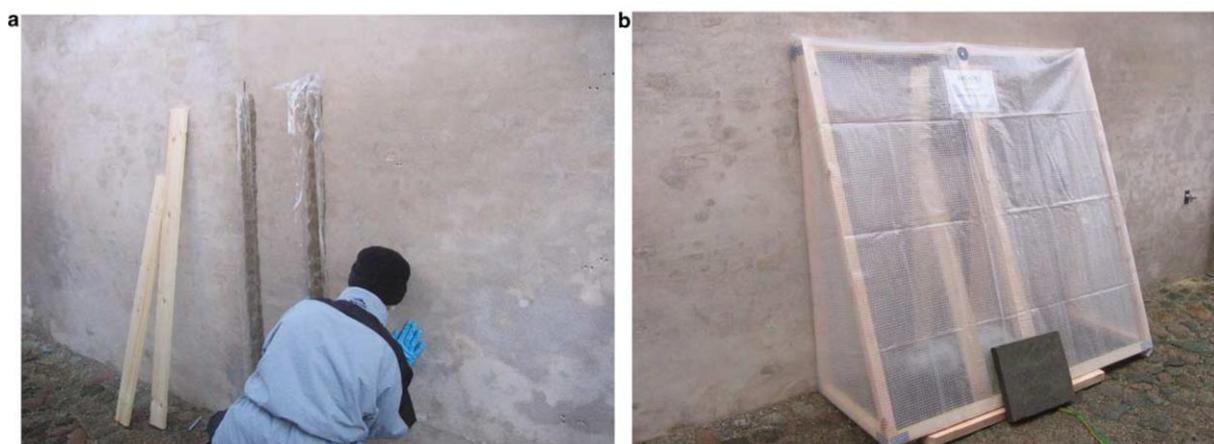
*Sistema di drenaggio (a sinistra) e bocchette di ventilazione (destra)*

<b>Sistema di trattamento</b>	Ventilazione meccanica (canale su muro perimetrale in cemento armato + PVC e griglie in acciaio) Drenaggio (tubazione su muro perimetrale; impermeabilizzazione con membrana drenante e telo geotessile, riempimento con ghiaia)
<b>Condizioni ambientali</b>	Edifici con ambiente interno non climatizzato (Portogallo)
<b>Tecnologia costruttiva</b>	Convento (XIV sec., ultimo restauro del 1940) in muratura (sp. 70-200 cm) Convento (XI sec., ultimo restauro del 1990) in muratura
<b>Monitoraggi</b>	T-RH
<b>Tempo acquisizione</b>	--
<b>Sintesi risultati</b>	Riduzione RH, macchie superficiali ed efflorescenze saline superficiali

Stazi A. et al. (1996)[186]	
<b>Sistema di trattamento</b>	Intonaco macro-poroso (n. 12 intonaci deumidificanti, n. 4 rinzaffi, n. 4 intonaci tradizionali)
<b>Condizioni ambientali</b>	Ambiente interno climatizzato Immersione modello in H <sub>2</sub> O distillata (n. 5 pareti) / soluzione satura di Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
<b>Tecnologia costruttiva</b>	Modello in muratura (n. 10 pareti, L. 120 cm, H. 80 cm, Sp. 25 cm)
<b>Monitoraggi</b>	Livello risalita capillare (superficiale) MC% - metodo gravimetrico
<b>Tempo acquisizione</b>	18 mesi
<b>Sintesi risultati</b>	Aumento del contenuto umido nella struttura (superficiale e in profondità) con il rivestimento di intonaco Limitata comparsa di efflorescenze nella zona con intonaco macro-poroso, ma limitata evaporazione di acqua



<b>Sistema di trattamento</b>	Elettrosmosi ( $I = 20-60 \text{ mA}$ ) con elettrodi in ferro + rivestimento plastico ( $\varnothing 0.5 \text{ cm}$ , profondità $3 \text{ cm}$ )
<b>Condizioni ambientali</b>	Edificio con ambiente chiuso non climatizzato
<b>Tecnologia costruttiva</b>	Edificio a due piani (1950) – muro analizzato (L. $247 \text{ cm}$ , H. $191 \text{ cm}$ , Sp. $11 \text{ cm}$ ) in mattoni gialli e rossi danesi + malta di calce + intonaco cementizio
<b>Monitoraggi</b>	MC% - metodo gravimetrico
<b>Tempo acquisizione</b>	< 1 mese
<b>Sintesi risultati</b>	MC% mattone = 10-15%; MC% malta = 3-6% Bagnatura superficiale nella zona pavimentale vicino al catodo

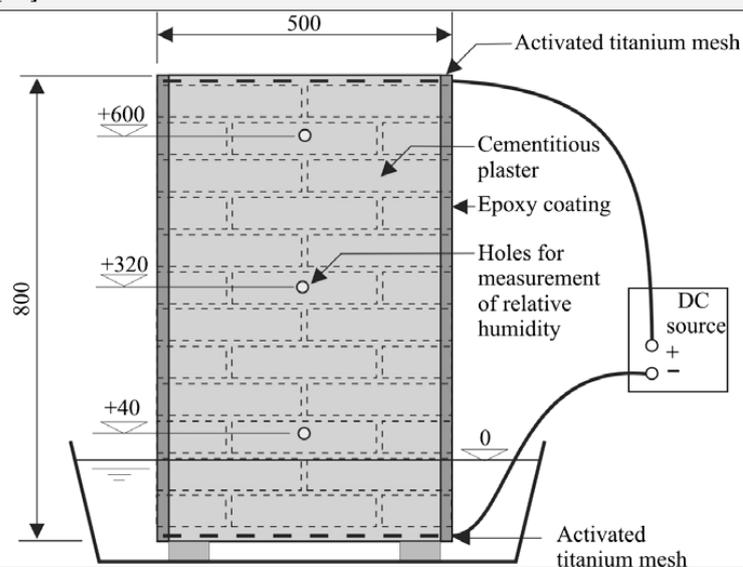


(a) posizionamento elettrodi, (b) sistema protettivo in plastica

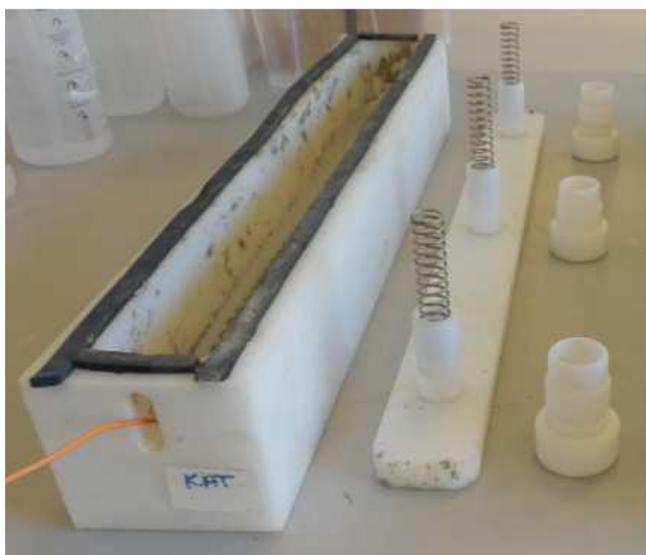
<b>Sistema di trattamento</b>	Elettrososi (ddp = 11-136 V, I = 40 mA) con elettrodi in acciaio (9 punti di misura; L. 1.5 m, H. 0.5-2.0 m, Ø 6 mm, interasse 35 cm)
<b>Condizioni ambientali</b>	Edificio con ambiente interno climatizzato (Danimarca)
<b>Tecnologia costruttiva</b>	Muratura intonacata, ricoperta con sistema in plastica per evitare evaporazione
<b>Monitoraggi</b>	MC% - metodo gravimetrico Concentrazione salina (Cl, Ni) pH
<b>Tempo acquisizione</b>	1 mese
<b>Sintesi risultati</b>	Riduzione contenuto d'acqua superficiale da evaporazione Concentrazione salina elevata nell'anodo, che si riduce con l'applicazione di DC



<b>Sistema di trattamento</b>	Elettrosmosi (3 punti, Ø 9 mm, interasse 35 cm)
<b>Condizioni ambientali</b>	Edificio con ambiente interno climatizzato (Nuova Zelanda)
<b>Tecnologia costruttiva</b>	Edificio (1870, ristrutturazione 1990) con muratura in mattone di argilla + malta + intonaco
<b>Monitoraggi</b>	MC% - metodo gravimetrico Concentrazione salina (Cl, Na, NO, SO) pH
<b>Tempo acquisizione</b>	2 mesi
<b>Sintesi risultati</b>	Aumento del contenuto d'acqua nel catodo Diminuzione concentrazione salina



<b>Sistema di trattamento</b>	Elettrosmosi ( $I = 20 \text{ mA/m}^2$ )
<b>Condizioni ambientali</b>	Ambiente chiuso climatizzato
<b>Tecnologia costruttiva</b>	Campione muratura (H. 80 cm, Sp. 25 cm) parzialmente immerso in acqua, con mattoni in argilla artigianali ( $\rho = 1.25 \text{ g/cm}^3$ , CA = 22.5%), estrusi ( $\rho = 1.70 \text{ g/cm}^3$ , CA = 18.9%), blocchi di tufo ( $\rho = 1.17 \text{ g/cm}^3$ , CA = 28.5%) + malta premiscelata calce-cemento ( $\rho = 1.74 \text{ g/cm}^3$ , CA = 12.2%) + intonaco cementizio Resina epossidica (impermeabilizzazione laterale)
<b>Monitoraggi</b>	Conduttività MC% - metodo gravimetrico T/RH superficiale (3 punti di misura)
<b>Tempo acquisizione</b>	8 mesi
<b>Sintesi risultati</b>	Mattone (superficiale) H. 4 cm = saturo; H. 18 = asciutto No variazioni MC%

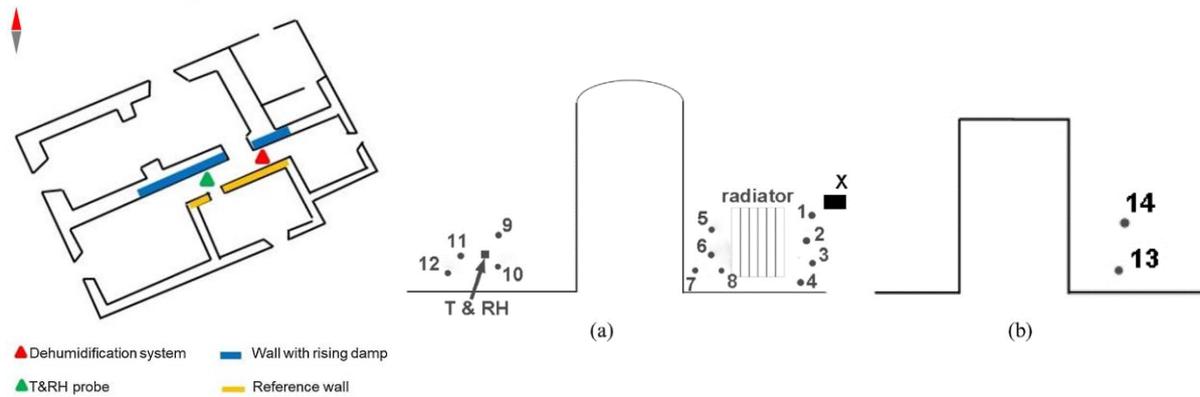


*A destra set-up elettrodi; a sinistra, posizionamento elettrodi sulla muratura, con supporto in legno per rivestimento con film plastico*

<b>Sistema di trattamento</b>	Elettrosmosi con elettrodi metallici + rivestimento plastico (H. 30-60-90-120-150 cm, interasse 0.5-1 m)
<b>Condizioni ambientali</b>	Edificio con ambiente interno climatizzato (Danimarca)
<b>Tecnologia costruttiva</b>	Edificio in mattone giallo danese ( $\varphi = 28\%$ , 22.8 x 10.8 x 5.4 cm) + malta di calce-cemento + intonaco calce-cemento
<b>Monitoraggi</b>	MC% - metodo gravimetrico Concentrazione salina (Cl, Ni, SO) pH
<b>Tempo acquisizione</b>	< 1 mese
<b>Sintesi risultati</b>	Nessuna variazione contenuto d'acqua nella muratura

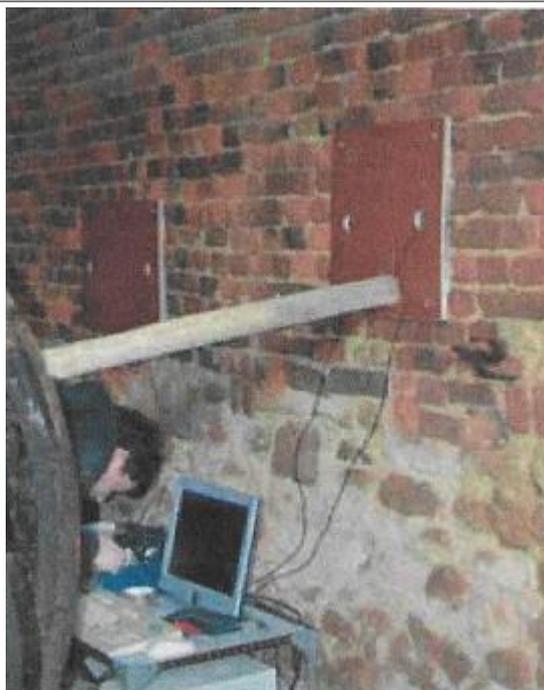


<b>Sistema di trattamento</b>	Elettrosmosi / Barriera chimica (iniezione crema silossanica/crema silanica/silanica-silossanica, iniezione liquida silani-silossani; applicazione nella sola chiesa belga)
<b>Condizioni ambientali</b>	Ambiente interno non climatizzato (Paesi Bassi, Belgio)
<b>Tecnologia costruttiva</b>	Magazzino (Paesi Bassi, XVII sec.) a due piani in mattone Chiesa (Paesi Bassi, XIII sec.) in mattoni/pietra e intonaco interno Chiesa (Belgio, XVIII sec.) in mattoni (sp. 87 cm) e pietra blu (belga/arenaria)
<b>Monitoraggi</b>	MC% - metodo gravimetrico
<b>Tempo acquisizione</b>	12 mesi
<b>Sintesi risultati</b>	Magazzino e chiesa (Paesi Bassi): nessuna variazione MC% nelle aree trattate con sistema elettrosmotico Chiesa (Belgio): riduzione MC% nelle aree trattate con barriera chimica; nessuna variazione MC% nelle aree trattate con sistema elettrosmotico



(a) punti di misurazione MC% sulla muratura soggetta a risalita capillare, la scatola nera indica il dispositivo elettromagnetico e (b) punti di misurazione sulla parete di riferimento

<b>Sistema di trattamento</b>	Elettromagnetico con impulsi in multifrequenza (0-10 <sup>4</sup> Hz, H. 80 cm)
<b>Condizioni ambientali</b>	Edificio con ambiente interno climatizzato (Firenze)
<b>Tecnologia costruttiva</b>	Edificio (XV sec., espansione nel XX sec.) in muratura (sp. 20-70 cm) in blocchi di arenaria, malta di calce e intonaco in malta di calce
<b>Monitoraggi</b>	T-RH interna (data logger), T-RH esterna (stazione metereologica) T+MC% (sonde igrometriche, profondità 20 cm, timestep 60 min) MC% + indice salinità (Evanescent Field Dielectrometry)
<b>Tempo acquisizione</b>	10 mesi
<b>Sintesi risultati</b>	No variazioni di MC% nella muratura o altri parametri, correlata al dispositivo elettromagnetico



<b>Sistema di trattamento</b>	Elettrosmosi-foresi (ddp = 20 V; elettrodi a piastra, H. 15-30 cm)
<b>Condizioni ambientali</b>	Ambiente interno non climatizzato (Belgio)
<b>Tecnologia costruttiva</b>	Muratura (sp. 40 cm) in mattoni + malta
<b>Monitoraggi</b>	HMC% - metodo gravimetrico (profondità 0-2 cm, 2-5 cm, 5-10 cm) Sali solubili
<b>Tempo acquisizione</b>	< 1 mese
<b>Doc. fotografica</b>	
<b>Sintesi risultati</b>	Riduzione contenuto salino: 58-40% nel mattone (rispettivamente 2-10 cm di profondità); 53-58% nella malta (rispettivamente 2-10 cm di profondità)

## **Appendice C**

### **Normativa Tecnica nazionale ed internazionale**

Le raccomandazioni NorMaL sono documenti tecnici formulati dalla Commissione NorMaL, che definiscono le metodologie unificate per lo studio delle alterazioni dei materiali lapidei e la valutazione dell'efficacia dei trattamenti conservativi su manufatti di interesse storico-artistico. Le norme UNI di competenza della Commissione Beni Culturali NorMaL armonizzano a livello nazionale il recupero e restauro dei beni culturali, ed infine sono presenti le norme europee EN approvate dal CEN, utili a standardizzare la normativa in tutti i paesi europei.

Tabella 65. Elenco raccomandazioni NorMaL (Fonte ICR).

<b>N. NorMaL</b>	<b>Titolo della Norma</b>
1/80	Alterazioni macroscopiche dei materiali lapidei: lessico
2/80	Archiviazione di materiali lapidei: schema di scheda
3/80	Materiali lapidei: campionamento
4/80	Distribuzione del volume dei pori in funzione del loro diametro
5/81	Misura dei parametri ambientali
5/82	Misura dei parametri ambientali
5/83	Misura dei parametri ambientali
5/86	Misura dei parametri ambientali
5/87	Misura dei parametri ambientali
6/81	Caratterizzazione dei materiali litici di cava: schema di scheda
7/81	Assorbimento d'acqua per immersione totale – capacità di imbibizione
8/81	Esame delle caratteristiche morfologiche al Microscopio Elettronico a Scansione (SEM)
9/82	Microflora autotrofa ed eterotrofa: tecniche di isolamento in coltura
9/88	Microflora autotrofa ed eterotrofa: tecniche di isolamento in coltura
10/82	Descrizione petrografica dei materiali lapidei naturali
11/82	Assorbimento d'acqua per capillarità – coefficiente di assorbimento capillare
11/85	Assorbimento d'acqua per capillarità – coefficiente di assorbimento capillare SOSTITUITA DALLA UNI 15801:2010
12/83	Aggregati artificiali di clasti e matrice legante non argillosa: schema di descrizione
14/83	Sezioni sottili e lucide di materiali lapidei: tecnica di allestimento
15/84	Manufatti e aggregati a matrice argillosa: schema di descrizione SOSTITUITA DALLA UNI 11084:2003
16/84	Caratterizzazione dei materiali lapidei in opera e del loro stato di conservazione: sequenza analitica
17/84	Elementi metrologici e caratteristiche dimensionali: determinazione grafica
18/84	Rilevamento della funzionalità degli impianti tecnici: schema di scheda
19/85	Microflora autotrofa ed eterotrofa: tecniche di indagine visiva SOSTITUITA DALLA UNI 10923:2001
20/85	Interventi conservativi: progettazione, esecuzione e valutazione preventiva
21/85	Permeabilità al vapore d'acqua
22/86	Misura della velocità di propagazione del suono
23/86	Terminologia tecnica: definizione e descrizione delle malte
23/87	Terminologia tecnica: definizione e descrizione delle malte SOSTITUITA DALLA UNI 10924:2001
24/86	Metodologia di rilevamento e di analisi della vegetazione
25/87	Microflora autotrofa ed eterotrofa: tecniche di isolamento e di mantenimento in coltura pura
26/87	Caratterizzazione delle malte da restauro
27/88	Caratterizzazione di una malta
28/88	Composizione chimica dei materiali lapidei

29/88	Misura dell'indice di asciugamento (Drying Index)
30/89	Metodi di controllo del biodeterioramento
31/89	Determinazione della calce e della magnesia residue
32/89	Determinazione gas volumetrica della CO <sub>2</sub>
33/89	Misura dell'angolo di contatto
34/91	Analisi di materiali argillosi mediante XRD
35/91	Caratterizzazione di biocidi: schema di scheda
36/92	Glossario per l'edilizia storica nei trattati dal XV al XIX secolo
37/92	Trattamenti biocidi: schema di scheda per archiviazione dati
38/93	Valutazione sperimentale dell'efficacia dei biocidi
39/93	Rilevamento della carica microbica dell'aria
40/93	Misura ponderale di umidità in murature SOSTITUITA DALLA UNI 11085:2003
41/93	Misura ponderale di umidità in superfici murarie dipinte SOSTITUITA DALLA UNI 11085:2003
42/93	Criteri generali per l'applicazione delle PnD
43/93	Misure colorimetriche di superfici opache
44/93	Assorbimento d'acqua a bassa pressione

Tabella 66. Elenco UNI-NorMaL beni culturali (Fonte ICR).

<b>N. UNI</b>	<b>Titolo della Norma</b>
10739:1998	Beni culturali. Tecnologia ceramica – Termini e definizioni
10813:1999	Beni culturali. Materiali lapidei naturali ed artificiali – Verifica della presenza di microrganismi fotosintetici su materiali lapidei mediante determinazione spettrofotometrica UV/Vis delle clorofille e,b,c
10922:2001	Beni culturali – Materiali lapidei naturali ed artificiali – Allestimenti di sezioni sottili e sezioni lucide di materiali lapidei colonizzati da biodeteriogeni
10923:2001	Beni culturali – Materiali lapidei naturali ed artificiali – Allestimento di preparati biologici per l'osservazione al microscopio ottico SOSTITUISCE NORMAL 19/85
10924:2001	Beni culturali – Malte per elementi costruttivi e decorativi – Classificazione e terminologia SOSTITUISCE NORMAL 23/86 e NORMAL 23/87
10925:2001	Beni culturali – Materiali lapidei naturali ed artificiali – Metodologia per l'irraggiamento con luce solare artificiale
10945:2001	Beni culturali – Caratterizzazione degli strati pittorici – Generalità sulle tecniche analitiche impiegate
11060:2003	Beni culturali – Materiali lapidei naturali ed artificiali. Determinazione della massa volumica e della percentuale dei vuoti
11084:2003	Beni culturali – Materiali ceramici – Caratterizzazione SOSTITUISCE NORMAL 15/84
11085:2003	Beni culturali – Materiali lapidei naturali ed artificiali – Determinazione del contenuto d'acqua. Metodo ponderale SOSTITUISCE NORMAL 40/93 e NORMAL 41/93
11086:2003	Beni culturali – Materiali lapidei naturali ed artificiali – Determinazione del contenuto d'acqua d'equilibrio
11088:2003	Beni culturali – Malte storiche e da restauro – Caratterizzazione chimica di una malta. Determinazione del contenuto di aggregato siliceo e di alcune specie solubili
11089:2003	Beni culturali – Malte storiche e da restauro – Stima della composizione di alcune tipologie di malte
11118:2004	Beni culturali – Manufatti lignei – Criteri per l'identificazione delle specie legnose
11119:2004	Beni culturali – Manufatti lignei – Strutture portanti degli edifici – Ispezione in situ per la diagnosi degli elementi in opera
11121:2004	Beni culturali – Materiali lapidei naturali ed artificiali – Determinazione in campo del contenuto di acqua con il metodo al carburo di calcio
11130:2004	Beni culturali – Manufatti lignei – Terminologia del degradamento del legno
11138:2004	Beni culturali – Manufatti lignei – Strutture portanti degli edifici – Criteri per la valutazione preventiva, la progettazione e l'esecuzione di interventi
11139:2004	Beni culturali – Malte storiche – Determinazione del contenuto di calce libera e di magnesio libera
11140:2004	Beni culturali – Malte storiche – Determinazione del contenuto di anidride carbonica

<b>15757:2010</b>	Conservazione dei beni culturali – Specifiche concernenti la temperatura e l’umidità relativa per limitare i danni meccanici causati dal clima ai materiali organici igroscopici
<b>15758:2010</b>	Beni culturali – Misurazione in campo della temperatura dell’aria e della superficie dei manufatti
<b>15801:2010</b>	Conservazione dei beni culturali – Metodo di prova – Determinazione dell’assorbimento dell’acqua per capillarità
<b>16242:2013</b>	Conservazione dei beni culturali – Procedure e strumenti per misurare l’umidità dell’aria e gli scambi di vapore tra l’aria e i beni culturali

