



POLITECNICO DI BARI

Dipartimento di Scienze dell'Ingegneria Civile e dell'Architettura - DICAR
Corso di Laurea Magistrale A Ciclo Unico in Ingegneria Edile-Architettura

TESI DI LAUREA IN FISICA TECNICA AMBIENTALE

VALUTAZIONE IGROTERMICA DI SOLUZIONI TECNICHE D'ISOLAMENTO DELL' INVOLUCRO EDILIZIO PER IL RECUPERO ENERGETICO IN ITALIA PER MEZZO DI SIMULAZIONI DINAMICHE

Relatore:

Prof. Ing. Pietro Stefanizzi

Correlatori:

PhD Ing. Eleonora Marra

PhD Ing. Daniel Zirkelbach

Laureanda:

Valeria Cascione

*A chi mi ha aperto porte e
mostrato cammini
(José Saramago)*

Ringraziamenti

Ringrazio il professor Pietro Stefanizzi, relatore di questa tesi, per la supervisione, la disponibilità e il prezioso aiuto anche a distanza.

Ringrazio enormemente Eleonora Marra per la pazienza che ha dimostrato nei miei confronti, per gli ottimi consigli e per il suo sostegno nella realizzazione di tutto il lavoro. È stata un'ottima guida, un punto di riferimento e anche un'amica.
Grazie di tutto!

Vorrei anche ringraziare Daniel Zirckelbach per il clima di grande serenità, collaborazione e disponibilità, in cui mi ha permesso di lavorare in questi mesi.

Vorrei inoltre dire grazie a Hartwig Künzel, che mi ha permesso di entrare come tesista al Fraunhofer IBP e di vivere per sei mesi in una realtà aziendale molto importante e la dottoressa Stefania Liuzzi, che mi ha sostenuto fin dal principio nella realizzazione della tesi.

Ovviamente non posso dimenticare i colleghi del gruppo Hygrothermik del Fraunhofer per il loro consigli e la loro collaborazione, ma soprattutto per avermi accolto nella loro "famiglia".

Ai miei compagni di lavoro, ai miei amici di una vita e a quelli in giro per il mondo devo dire grazie per l'incoraggiamento e per la forza che mi hanno trasmesso, anche se lontani.

Per ultimi ma non ultimi, voglio ringraziare i miei genitori e la mia famiglia per avermi permesso di raggiungere questo traguardo e per essermi stati accanto sia nei momenti belli, sia nei momenti di sconforto; ma soprattutto per avermi sempre appoggiato in tutti i miei progetti e per aver compreso il mio grande desiderio di scoprire il mondo.

Indice

Indice.....	1
Notazioni.....	5
Notazioni in lettere latine.....	5
Notazioni in lettere greche	6
Simboli matematici.....	6
Acronimi.....	6
Introduzione.....	9
1 Risanamento energetico e verifiche igrotermiche di edifici esistenti in Italia	12
1.1 Dalla riqualificazione energetica ai controlli igrotermici	12
1.2 Sistemi d'isolamento per il risanamento energetico.....	14
1.2.1 Isolamento esterno	14
1.2.2 Isolamento in intercapedine	15
1.2.3 Isolamento interno	16
1.2.4 Riepilogo delle principali caratteristiche	17
1.3 Effetti dell'umidità nelle soluzioni tecniche sottoposte a risanamento energetico	18
1.3.1 Origine dell'umidità.....	18
1.3.2 Tipologie di degrado	18
1.4 Quadro legislativo e normativo	23
1.4.1 La legislazione italiana.....	23
1.4.2 La normativa tecnica.....	25
1.4.2.1 Il metodo di Glaser secondo la UNI EN ISO 13788.....	25
1.4.2.2 Le simulazioni dinamiche secondo la UNI EN 15026	26
1.4.2.3 Dati climatici secondo la UNI 10349	28
1.4.3 Raccomandazioni WTA	29
1.5 Metodi di valutazione igrotermica	31
1.5.1 Metodo tradizionale: procedura di calcolo semplificata (<i>Glaser</i>).....	32
1.5.2 Simulazioni igrotermiche dinamiche.....	33
1.5.2.1 Accumulo e trasporto di calore	34
Accumulo di energia	34
Trasporto di calore.....	34

1.5.2.2	Trasporto di umidità.....	35
1.5.2.3	Caratterizzazione del flusso termico e di umidità	36
1.5.2.4	Caratteristiche dei materiali	38
	Densità apparente ($\rho\rho$)	38
	Porosità (ϵ).....	39
	Calore specifico (c)	39
	Conduttività termica (λ)	40
	Resistenza alla diffusione del vapore (μ)	40
	Contenuto d'acqua (w).....	41
	Coefficienti di trasporto liquido (D_{ws} e D_{ww})	43
2	Impostazione delle simulazioni.....	44
2.1	Definizione delle stratigrafie e dei materiali	44
2.1.1	Soluzioni tecniche originarie	44
2.1.2	Materiali isolanti	48
2.1.3	Un nuovo materiale isolante: la tifa	52
2.1.4	Impostazione di stratigrafia e materiali in WUFI®	54
2.2	Orientamento, inclinazione e altezza della chiusura.....	57
2.3	Caratteristiche superficiali	59
2.4	Condizioni iniziali.....	61
2.5	Impostazioni di calcolo	63
2.6	Clima	64
2.6.1	Clima interno.....	64
2.6.2	Clima esterno.....	66
2.7	Riepilogo delle simulazioni effettuate	76
3	Valutazione dei risultati delle simulazioni	79
3.1	Procedura per la valutazione dei risultati in WUFI®	79
3.1.1	Valutazione numerica	80
3.1.2	Valutazione igrotermica: panoramica dei risultati.....	83
3.1.2.1	Contenuto d'acqua	84
3.1.2.2	Profili di temperatura e umidità.....	86
3.1.2.3	Isoplete.....	88
3.1.2.4	Moduli di post-processing per la valutazione dei risultati.....	89

Modulo WUFI® Bio	89
Modulo WUFI® Corr.....	91
Modulo per la trasmittanza dinamica	93
3.2 Valutazione igrotermica: caso studio	94
3.2.1 Esportazione dei risultati.....	94
3.2.2 Criteri di controllo	96
3.2.2.1 Condensa superficiale e interstiziale	96
3.2.2.2 Rischio di formazione di muffa	96
3.2.2.3 Attacco gelo-disgelo	97
3.2.2.4 Diminuzione del potenziale di asciugamento.....	97
3.2.2.5 Decadimento delle prestazioni energetiche.....	97
3.2.2.6 Corrosione dei metalli.....	97
3.2.3 Analisi di soluzioni tecniche con isolamento esterno	98
3.2.3.1 Contenuto totale d'acqua.....	98
3.2.3.2 Contenuto d'acqua nello strato isolante.....	99
3.2.3.3 Temperatura e umidità relativa sul lato freddo dell'isolante.....	100
3.2.3.4 Temperatura e umidità relativa sul lato caldo dell'isolante	102
3.2.3.5 Temperatura e umidità relativa sulla superficie interna	103
3.2.3.6 Condensa interstiziale	104
3.2.3.7 Flusso termico e perdite di calore.....	105
3.2.4 Analisi di soluzioni tecniche con isolamento interno	106
3.2.4.1 Contenuto totale d'acqua.....	107
3.2.4.2 Contenuto di umidità nello strato isolante.....	109
3.2.4.3 Temperatura e umidità relativa sul lato freddo dell'isolante.....	112
3.2.4.4 Temperatura e umidità relativa sulla superficie interna	115
3.2.4.5 Condensa interstiziale	115
3.2.4.6 Flusso termico e perdite di calore.....	116
3.2.5 Riepilogo dei risultati.....	118
3.2.5.1 Muratura in arenaria	119
Isolamento esterno	119
Isolamento interno	120
3.2.5.2 Muratura in tufo	122

Isolamento esterno	122
Isolamento interno	123
3.2.5.3 Muratura in mattoni pieni	126
Isolamento esterno	126
Isolamento interno	126
3.2.5.4 Muratura in mattoni forati.....	127
Isolamento esterno	127
Isolamento interno	128
3.2.5.5 Muratura a cassa vuota	130
Isolamento esterno	130
Isolamento in intercapedine	131
Isolamento interno	132
3.2.5.6 Muratura in calcestruzzo alleggerito	135
Isolamento esterno	135
Isolamento interno	136
3.2.5.7 Muratura in calcestruzzo	138
Isolamento esterno	138
Isolamento interno	140
3.2.5.8 Sinossi dei risultati.....	142
Conclusioni	146
Bibliografia.....	150
Appendice.....	154

Notazioni

Notazioni in lettere latine

A	[kg/m ² s ^{0.5}]	coefficiente di assorbimento del liquido per capillarità
b	[-]	fattore d'approssimazione del metodo per due punti
b _λ	[M.-%]	supplemento per umidità della conduzione termica
c	[J/kgK]	calore specifico
d	[m]	spessore
D _W	[m ² /s]	coefficiente di trasporto liquido capillare
D _{WS}	[m ² /s]	coefficiente di trasporto liquido di suzione
D _{WW}	[m ² /s]	coefficiente di trasporto liquido di distribuzione capillare
D _φ	[kg/ms]	coefficiente di diffusione dell'umidità
f _{Rsi}	[-]	fattore di temperatura
f _{Rsi,min}	[-]	fattore di temperatura minimo
GG	[GG]	gradi giorno
g _v	[Kg/m ² s]	flusso di vapore
H	[J/m ³]	entalpia totale
h _e	[W/m ² K]	coefficiente liminare esterno
h _i	[W/m ² K]	coefficiente liminare interno
h _v	[J/kg]	calore di evaporazione dell'acqua
T	[K]	temperatura assoluta
w	[kg/m ³]	contenuto d'acqua
w ₀	[kg/m ³]	contenuto d'acqua a 0% UR
w ₈₀	[kg/m ³]	contenuto d'acqua a 80% UR
w _f	[kg/m ³]	contenuto di umidità alla saturazione libera
h _v	[J/kg]	calore di evaporazione dell'acqua
p	[Pa]	pressione
p _i	[Pa]	pressione parziale interna
p _k	[Pa]	pressione parziale della superficie k-esima
p _{sat}	[Pa]	pressione di saturazione
R	[m ² K/W]	resistenza termica
R ₁	[-]	coefficiente primario di pioggia diretta
R ₂	[s/m]	coefficiente secondario di pioggia diretta
R _{se}	[m ² K/W]	resistenza termica superficiale esterna
R _{si}	[m ² K/W]	resistenza termica superficiale interna
s _d	[m]	spessore equivalente d'aria
S _v	[J/m ³ s]	energia assorbita/generata per evaporazione / condensazione
UR	[%]	umidità relativa
v _i	[kg/m ³]	contenuto di vapore dell'aria
v _{sat}	[kg/m ³]	contenuto di vapore dell'aria satura

Notazioni in lettere greche

α_s	[-]	coefficiente di assorbimento di onde corte
$\delta_p \delta_p$	[kg/msPa]	permeabilità al vapore
ε	[m ³ /m ³]	porosità
ε_s	[-]	coefficiente di emissione onde lunghe
ϑ	[°C]	temperatura
ϑ_e	[°C]	temperatura esterna
ϑ_i	[°C]	temperatura interna
ϑ_{se}	[°C]	temperatura superficiale esterna
ϑ_{si}	[°C]	temperatura superficiale interna
$\vartheta_{si,min}$	[°C]	temperatura superficiale interna critica
λ	[W/mK]	conducibilità termica nei materiali umidi
λ_0	[W/mK]	conducibilità termica nei materiali secchi
μ	[-]	coefficiente di resistenza alla diffusione di vapore
ρ	[kg/m ³]	densità apparente
φ	[-]	umidità relativa
φ_e	[-]	umidità relativa esterna
φ_i	[-]	umidità relativa interna
φ_{si}	[-]	umidità relativa superficiale interna

Simboli matematici

δ	differenziale non esatto
Δ	operatore differenza
∇	operatore Nabla
d	differenziale esatto

Acronimi

ANIT	Associazione Nazionale per l'Isolamento Termo-Acustico
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
CTI	Comitato Termotecnico Italiano
DL	Decreto Legge
DM	Decreto Ministeriale
DPR	Decreto del Presidente della Repubblica
DLgs	Decreto Legislativo
ENEA	Agenzia Nazionale per le Nuove Tecnologie, l'Energia e lo Sviluppo Economico Sostenibile
EPS	Polistirene espanso
IBP	Institute for Building Physics
ISTAT	Istituto Nazionale di Statistica

Notazioni

MIPAAF	Ministero delle Politiche Agricole, Alimentari e Forestali
NMR	Risonanza magnetica nucleare
PE	Polietilene
TRY	Test Reference Year (anno di riferimento per simulazioni)
WAC	WUFI® ASCII Climate (File Climatico)
WTA	International Association for Science and Technology of Building Maintenance and Built Heritage Conservation
WUFI®	Wärme und Feuchte Instationär (programma di simulazione igrotermica dinamica)
XPS	Polistirene estruso

Introduzione

Lo studio presentato in questa tesi di laurea è incentrato sulla valutazione igrotermica, mediante simulazioni dinamiche, di chiusure opache verticali esistenti, tipiche del contesto edile italiano, sottoposte a risanamento energetico.

Tale tesi è il frutto di uno stage di sei mesi, finanziato da una borsa di studio Erasmus +, svolto presso l'Istituto di Fisica Tecnica del Fraunhofer IBP di Holzkirchen, in Germania. Qui è stato sviluppato il programma di simulazione dinamica WUFI[®], lo strumento usato in questa tesi per la valutazione igrotermica dell'involucro.

L'applicazione ex-novo di materiali isolanti per risanare energeticamente l'esistente, se da un lato migliora la trasmittanza termica dell'involucro, dall'altro rende la parete meno permeabile al vapore, modificandone le caratteristiche originarie e lasciandola in genere più umida. Ciò comporta un innalzamento finale del valore della trasmittanza termica e un aumento delle escursioni termiche nell'ambiente interno, con una conseguente diminuzione del comfort dell'utenza. Per evitare gli eventuali problemi legati alla maggiorata presenza d'acqua nell'involucro edilizio, diventa dunque fondamentale effettuare le cosiddette verifiche igrotermiche.

A riguardo, la normativa internazionale propone, accanto al tradizionale metodo di Glaser basato sul mero trasporto diffusivo, il ricorso alle simulazioni igrotermiche dinamiche. Queste permettono, in particolare, di considerare simultaneamente il trasporto e l'accumulo di calore e umidità nei materiali edili, il comportamento dell'utenza, l'influenza di condizioni iniziali e climatiche, ivi compresa la pioggia e la radiazione solare in diverse località. I risultati così ottenuti possono essere valutati non solo in termini di condensazione superficiale e interstiziale, ma anche di durabilità, considerando cioè l'attacco biologico, il gelo/disgelo, la corrosione, ecc.

Tuttavia, poiché le simulazioni igrotermiche dinamiche rappresentano uno strumento relativamente nuovo e ancora poco noto in Italia, l'obiettivo della tesi è quello di fornire uno strumento avanzato per l'analisi igrotermica dell'involucro edilizio, mostrando un esempio applicativo per alcune soluzioni tecniche di chiusura verticale tipiche del patrimonio edilizio esistente italiano.

A tal fine la tesi è stata articolata in tre capitoli, di cui il primo funge da introduzione generale al tema del risanamento energetico e delle verifiche igrotermiche in Italia, chiarendo al contempo le differenze tra metodi di verifica tradizionali e simulazioni dinamiche. Il secondo affronta il problema dei dati di partenza per tali simulazioni, con particolare riferimento a proprietà dei materiali e dati climatici. Il terzo capitolo illustra i risultati delle simulazioni effettuate (più di un migliaio), confrontando soluzioni tecniche con diversi materiali isolanti e in varie zone climatiche, verificandole secondo determinati criteri empirici e normativi.

Il primo capitolo introduce dunque il tema del risanamento energetico dell'involucro edilizio, descrivendo i principali sistemi d'isolamento usati per il recupero di edifici esistenti, quali sistemi a cappotto o isolamento esterno, isolamento dall'interno e in intercapedine, evidenziandone al contempo pregi, difetti e possibilità di applicazione.

Si enunciano poi le problematiche degli involucri edilizi così risanati in merito agli aspetti termici e igrometrici, con particolare attenzione all'effetto dell'umidità su di essi e alle conseguenti forme di degrado che vi si generano: problemi estetici e superficiali, biologici, strutturali, legati alla penetrazione dell'acqua piovana e al gelo.

Di seguito, questi stessi aspetti igrotermici sono inquadrati in ambito normativo e legislativo, non solo in Italia ma anche in Europa. Ci si sofferma segnatamente sui metodi di valutazione igrotermica tradizionali e innovativi prescritti, ovvero il metodo di Glaser (UNI EN ISO 13788) e le basi del calcolo dinamico (UNI EN 15026), con particolare attenzione alle proprietà dei materiali e ai fenomeni fisici coinvolti. Per quanto attiene invece al quadro legislativo italiano, vengono presi in esame i documenti a partire dagli anni '90 fino al recente DM 26/6/2015. L'excursus normativo si conclude con la UNI 10349 sui dati climatici e con le linee guida mitteleuropee WTA, con raccomandazioni per la valutazione igrotermica di edifici soggetti a recupero edilizio.

Il secondo capitolo ha come oggetto l'impostazione delle simulazioni dinamiche, ovvero di quali dati sia necessario disporre per poterle eseguire con successo e quali dati siano stati usati nello specifico per simulare chiusure verticali in Italia.

In primo luogo vengono definite le stratigrafie e i materiali da simulare, con riferimento sia alle soluzioni tecniche originarie, sia a quelle risanate e dunque dotate di strato isolante ed eventualmente di intonaco/trattamento idrorepellente. In particolare, si considerano sette diverse soluzioni tecniche: parete in arenaria, tufo, calcestruzzo, calcestruzzo alleggerito, mattone pieno, mattone forato e a cassa vuota; esse sono isolate dall'esterno, dall'interno ed eventualmente in intercapedine, con i seguenti materiali: lana minerale (con e senza barriera al vapore), polietilene, polistirene, poliuretano, fibra di legno, sughero, silicato di calcio e perlite. A tali isolanti, i più usati in Italia, è stata aggiunta la tifa, materiale innovativo di origine naturale, messo a punto presso il Fraunhofer IBP.

Accanto alla geometria e ai materiali di ogni soluzione tecnica, si sono definite le caratteristiche superficiali, l'orientamento della chiusura, le condizioni iniziali e al contorno. Queste ultime sono rappresentate dal clima interno ed esterno. Le condizioni interne sono ricavate da modelli normati, mentre i dati climatici esterni sono difficilmente reperibili, soprattutto quelli relativi a pioggia e direzione del vento. Pertanto, parte del lavoro svolto ha riguardato la ricerca, il controllo e l'elaborazione

di dati attendibili, soprattutto per l'Italia meridionale. Non potendo svolgere tale cernita per ogni provincia italiana, si è diviso il territorio nazionale in otto zone climatiche, con caratteristiche termiche e pluviometriche specifiche. Tutte le soluzioni tecniche sono state dunque verificate in ognuna di queste otto zone.

I risultati delle simulazioni così impostate, eseguite col suddetto programma di calcolo WUFI® Pro, sono l'oggetto del terzo e ultimo capitolo.

Questo prende avvio con una disanima della procedure di valutazione dei risultati delle simulazioni dinamiche, dall'analisi numerica di convergenza fino alla verifica igrotermica vera e propria. In particolare, vengono analizzati e confrontati con valori limite di riferimento il contenuto d'acqua totale, il contenuto d'acqua nello strato isolante, la temperatura e l'umidità relativa in determinate posizioni di controllo della chiusura, ovvero la superficie interna e il lato caldo dell'isolante per il rischio muffa, il lato freddo dell'isolante e la superficie esterna per il rischio gelo. L'andamento del contenuto d'acqua totale chiarisce se la soluzione tecnica possiede un potenziale d'asciugamento adeguato, mentre il contenuto d'acqua nell'isolante, unitamente alle perdite di calore, serve a valutare l'efficienza termica effettiva della chiusura.

Si passa poi ad analizzare nel dettaglio tutte le soluzioni tecniche, per concludere infine quali di queste possano ritenersi accettabili dal punto di vista igrotermico e quali invece siano da respingere e secondo quali criteri, in base alle diverse caratteristiche climatiche italiane e nel rispetto della legislazione vigente.

1 Risanamento energetico e verifiche igrotermiche di edifici esistenti in Italia

In questo primo capitolo s'introducono i principali interventi di risanamento energetico dell'involucro e i più frequenti problemi legati a una non attenta progettazione igrotermica della chiusura, così da poterne descrivere i limiti prestazionali e le verifiche prescritte dalla legge italiana e dalla normativa internazionale.

1.1 Dalla riqualificazione energetica ai controlli igrotermici

Negli ultimi decenni sempre di più si è posta attenzione sulla questione della riqualificazione energetica in Europa e in Italia, mettendo in discussione il ricorso all'eccessivo impiego di tecnologie dispendiose negli edifici antecedenti al 1970. I dati raccolti da [1] evidenziano come il settore delle costruzioni sia responsabile del consumo di più del 40% dell'energia prodotta totale e della produzione del 50% delle emissioni atmosferiche inquinanti.

Per questa ragione, attraverso il protocollo di Kyoto¹ e il "Pacchetto per il clima e l'energia"², le Nazioni Unite e in particolare l'Unione Europea stanno spingendo le singole Nazioni verso un limitato consumo delle risorse e delle energie non rinnovabili e verso lo sviluppo di tecnologie ecosostenibili.

A tal proposito è stata varata la Direttiva 2010/31/UE del Parlamento Europeo sulle prestazioni energetiche degli edifici (*Energy Performance of Building Directive, EPBD*) [2], che lascia massima libertà agli stati membri di stabilire i requisiti energetici minimi, ma definisce gli obiettivi da raggiungere, rafforzando il ruolo delle certificazioni e richiedendo anche che tutti gli edifici sottoposti a ristrutturazioni importanti rispondano a tali requisiti³.

¹ Il protocollo di Kyoto, che fa seguito alla convenzione quadro delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici, è uno dei più importanti strumenti giuridici internazionali volti a combattere i cambiamenti climatici. Sottoscritto nel febbraio 2005 a Kyoto, contiene l'impegno dei paesi industrializzati a ridurre le emissioni di alcuni gas serra.

² Il pacchetto clima-energia, approvato dal Parlamento Europeo nel Dicembre 2008, rappresenta il contributo della Commissione Europea al nuovo approccio strategico integrato, che propone di integrare la politica energetica con gli obiettivi in materia di lotta al mutamento climatico.

³ Il target principale per le nuove costruzioni implica che tutti gli edifici edificati dopo il 31 dicembre 2020 dovranno garantire l'autosufficienza energetica (DM-26/6/2015) tramite approvvigionamento da fonti rinnovabili, mentre quelli già esistenti dovranno essere convertiti in "edifici a zero energia" entro il 31 dicembre 2018, fatta eccezione per gli edifici storici ufficialmente protetti, edifici adibiti a luoghi di culto, fabbricati temporanei con un tempo di utilizzo non superiore a due anni, siti industriali, officine ed edifici agricoli non residenziali a basso fabbisogno energetico, fabbricati indipendenti con una metratura utile totale inferiore a 50 m²

In Italia, gli edifici antecedenti al 1970 costituiscono il 60% del patrimonio edificato (quota che sale fino all'80% se si considerano quelli costruiti fino al 1980), come illustrato in Figura 1.1. Per ragioni economiche, politiche, urbanistiche e culturali, infatti, si tende a recuperare più che a demolire e ricostruire, adattando gli edifici esistenti alle nuove esigenze dell'utenza e ai nuovi dettami di legge.

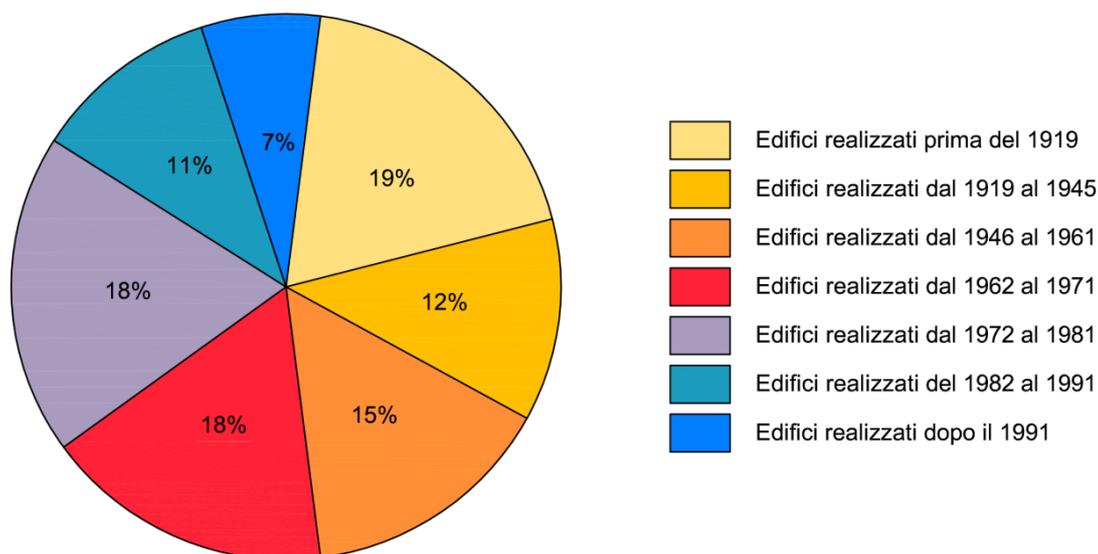


Figura 1.1 – Edifici a uso abitativo suddivisi in percentuale per epoca di costruzione [3].

Per questa ragione, questo studio si focalizza su interventi di recupero e di riqualificazione energetica degli edifici esistenti. Il risanamento consiste nel modificare le strutture opache verticali, aggiungendo agli strati esistenti diversi materiali isolanti, di vario spessore, tali da migliorare le prestazioni energetiche dell'involucro e rispettare le normative vigenti.

Bisogna però considerare che l'intervento di riqualificazione necessita di un'attenta analisi e valutazione, sia dell'edificio esistente (la maggior parte dell'edilizia ormai è storica), sia degli effetti che i nuovi materiali possono avere sulla chiusura (umidità, ponti termici, ecc.). L'applicazione di materiali isolanti migliora la trasmittanza dell'involucro, ma rende la parete più impermeabile al vapore, modificando le caratteristiche della chiusura originaria e lasciandola in genere più umida. La presenza di umidità comporta però l'aumento del valore della trasmittanza e l'aumento delle escursioni termiche all'interno dell'abitazione (diminuendo il comfort termico degli utenti).

Per evitare gli eventuali problemi legati alla presenza d'acqua nell'involucro (descritti in § 1.3), è importante effettuare le verifiche igrotermiche. Tradizionalmente, si è sempre utilizzato il *metodo di Glaser*, procedimento semplificato basato sul trasporto di umidità per pura diffusione in regime stazionario monodimensionale. Tale metodo, tuttavia, trascura molti aspetti (acqua di costruzione, meteorica, di risalita, ecc.), rendendolo inadeguato per la maggior parte delle soluzioni tecniche. In questi casi si

devono necessariamente usare le simulazioni igrotermiche dinamiche (descritte in § 1.5.2), dalle quali è possibile ottenere risultati realistici e più precisi, ma che, allo stesso tempo, richiedono informazioni per ora carenti in Italia (ad esempio dati climatici orari anche di pioggia e vento, proprietà dei materiali specifici, condizioni iniziali della chiusura, ecc.).

1.2 Sistemi d'isolamento per il risanamento energetico

Gli interventi ipotizzati per il risanamento energetico delle chiusure verticali sono tre, come descritti in [3],[4]:

- isolamento termico sul lato esterno;
- isolamento termico in intercapedine, nel caso di muratura a cassa vuota;
- isolamento termico sul lato interno.

1.2.1 Isolamento esterno

L'isolamento termico esterno, conosciuto anche come isolamento a cappotto, è un sistema di coibentazione degli elementi perimetrali di facciata, eseguito mediante incollaggio e fissaggio meccanico di pannelli isolanti sul lato esterno della muratura esistente.

Questo tipo d'intervento ha molti effetti positivi, quali:

- La continuità dell'isolamento termico con conseguente eliminazione o riduzione dei ponti termici costruttivi e geometrici.
- L'aumento dell'inerzia termica a seguito dello sfruttamento della capacità di accumulo termico della parete esistente, con effetti di smorzamento e sfasamento della temperatura esterna. Ciò comporta maggiore protezione dal caldo estivo e l'utilizzo degli apporti solari invernali, col conseguente miglioramento del benessere abitativo interno.
- La diminuzione del rischio d'insorgenza di condensazione superficiale e muffa sulla parete interna, a seguito sia dell'eliminazione dei ponti termici, che dello smorzamento termico.
- La presenza dell'isolante esternamente alla parete esistente protegge la muratura dall'esposizione diretta agli agenti atmosferici e dalle escursioni termiche, aumentandone la durabilità. Si evitano problemi di gelo-disgelo, erosione, efflorescenze e fessurazioni dovute a brusche variazioni termiche.
- La possibilità di permanenza degli occupanti durante la realizzazione dell'isolamento a cappotto.

Come in ogni intervento, ci sono anche degli effetti negativi, riassunti qui di seguito:

- Un isolamento a esterno è molto costoso, poiché coinvolge l'intera superficie della facciata e comporta la presenza di un ponteggio durante la realizzazione dell'intervento. Di conseguenza, sono necessarie autorizzazioni legali, a causa dell'ingombro perimetrale, e sussistono effettive difficoltà organizzative, legate al coinvolgimento di molte unità abitative e alle condizioni meteorologiche (la messa in opera del cappotto non può essere effettuata in caso di pioggia,, poiché l'intervento si svolge in esterno).
- L'intervento è sconsigliabile per ragioni estetiche o addirittura vietato nel caso di edifici storici vincolati. Il cappotto può rappresentare comunque un problema nel caso di modifiche in facciata o rifacimenti di soglie, davanzali e cornici.
- I materiali scelti per il cappotto devono rispettare determinati requisiti meccanici e di fissaggio per poter resistere alle sollecitazioni esterne (agenti atmosferici ed escursioni termiche). È richiesta, inoltre, una maggiore manutenzione.
- Brusche escursioni termiche del ciclo giorno-notte possono provocare, nella fase notturna, condensazione superficiale esterna e formazione di muffa.

1.2.2 Isolamento in intercapedine

L'isolamento termico in intercapedine consiste nel riempimento delle intercapedini d'aria, nel caso di pareti a cassa vuota, tramite insufflaggio oppure attraverso l'applicazione di pannelli. Il primo metodo consiste nell'inserimento del coibente attraverso dei fori praticati nella muratura; il secondo comporta maggiori costi e maggiore mano d'opera, poiché deve essere rimossa la cortina muraria interna. I materiali isolanti da utilizzare, inoltre, devono avere caratteristiche d'imputrescibilità, stabilità chimica e fisica, oltre che essere idrofobi. Nel caso di isolanti sfusi, come ad esempio l'argilla espansa, devono essere caratterizzati da un basso coefficiente d'attrito, per consentire un perfetto riempimento delle intercapedini, e avere spessore dell'intercapedine non inferiore a 3-4 cm.

Gli effetti positivi di tale intervento sono gli stessi dell'isolamento a cappotto, con la differenza che il coibente in intercapedine ha un carico termico esterno minore e una maggiore protezione dagli agenti atmosferici.

Al contrario, la parete presenta diversi problemi, quali:

- Staticità delle chiusure e aumento delle sollecitazioni igrometriche della cortina esterna (prima evitate dalla presenza dell'intercapedine stessa), con rischio di condensa.
- Irreversibilità dell'intervento, senza peraltro eliminare completamente i ponti termici.
- Inversione del flusso di vapore (opposto a quello usuale), a causa dell'irraggiamento solare. Questo porta ad un accumulo di vapore, che umidifica temporaneamente la parete interna e l'isolante, riducendo l'inerzia termica delle pareti e aumentando la conducibilità dell'isolante.

1.2.3 Isolamento interno

L'isolamento termico interno è un sistema di coibentazione degli elementi perimetrali di facciata, che prevede l'applicazione dello strato isolante sul lato interno della muratura esistente.

I principali vantaggi di questo sistema sono di seguito elencati:

- L'intervento lascia esteticamente inalterata la facciata dell'edificio, vincolo spesso imposto dagli enti preposti nel caso di stabili di valenza storico-culturale.
- È particolarmente indicato nel caso di abitazioni con funzionamento saltuario del sistema di riscaldamento o raffrescamento (tipicamente alloggi di vacanza abitati solo nel fine settimana), giacché la ridotta inerzia termica comporta un rapido raggiungimento della temperatura desiderata.
- I tempi e i costi dell'intervento sono molto ridotti, perché la messa in opera non comporta la realizzazione di un ponteggio esterno e può essere svolta indipendentemente per ogni singola unità abitativa. La lavorazione si svolge interamente in interno e dunque è possibile con qualsiasi condizione meteorologica.
- Immediata riduzione delle perdite di calore della componente opaca, con conseguente innalzamento della temperatura superficiale delle pareti. Ciò porta a un miglior comfort interno dell'unità abitativa.

Al contrario, l'isolamento interno ha una serie di problemi [5], quali:

- La mancata continuità dell'isolamento termico in prossimità di alcuni nodi, con conseguente persistenza dei ponti termici.
- Riduzione dei volumi abitabili, con conseguente perdita economica.
- Mancato sfruttamento dell'inerzia delle pareti; vengono dunque meno gli effetti di sfasamento e smorzamento dell'onda termica, generati dalla parete stessa.
- Se il materiale è troppo traspirabile, c'è il rischio di condensa interna (per evitarlo servono tenuta all'aria e aderenza fra isolante e parete perfette).
- La diminuzione del potenziale di asciugamento invernale.
- La parete interna non è resistente (non si possono attaccare mensole).
- L'umidità di risalita non si asciuga nella parte interna.
- La necessità di avere rivestimenti esterni idrofobi, per una maggiore protezione dalla pioggia battente.

1.2.4 Riepilogo delle principali caratteristiche

In Tabella 1.1 è possibile osservare l'elenco riassuntivo dei principali vantaggi e svantaggi dei tre sistemi d'isolamento descritti nei paragrafi precedenti [3],[4].

Tabella 1.1 – Pro e contro delle tre tipologie di sistema d'isolamento [3],[4].

	Isolamento esterno	Isolamento intercapedine	Isolamento interno
Pro	Ponti termici eliminati Isolamento termico estivo migliorato Protezione della parete dagli agenti atmosferici Rischio di condensa interna e muffa ridotto	Nessuna condensa interna Isolamento termico estivo migliorato	Costi ridotti Aspetti organizzativi e ergonomici Nessuna modifica della facciata Condizionamento veloce in ambienti abitati di rado
Contro	Costi elevati Condensa superficiale esterna Problemi organizzativi e ergonomici Vincoli storici e architettonici Resistenza meccanica dell'isolante ridotta	Ponti termici Condensa interstiziale Problemi statici Irreversibilità	Ponti termici Condensa superficiale interna o interstiziale Diminuzione del potenziale asciugamento Diminuzione dell'isolamento termico estivo Diminuzione della superficie abitabile Consigliato rivestimento idrorepellente

1.3 Effetti dell'umidità nelle soluzioni tecniche sottoposte a risanamento energetico

L'accumulo di acqua nei materiali può essere rischioso per le soluzioni tecniche, a seconda del potenziale di asciugamento delle stesse, ovvero la possibilità che l'acqua presente nella parete rievapori completamente durante il periodo estivo. Nel caso di difetti di progettazione o di messa in opera, o semplicemente di degrado naturale, la presenza di umidità può dare origine a gravi problemi (degrado fisico, degrado chimico, biodeterioramento, decadimento del benessere igrotermico), con conseguente abbattimento delle prestazioni dell'involucro.

1.3.1 Origine dell'umidità

La presenza di umidità nelle chiusure è riconducibile a cinque cause principali, classificate nel modo seguente [6]:

- umidità di costruzione o di cantiere;
- umidità meteorica (infiltrazioni da copertura, serramenti, murature, ecc.);
- umidità di condensazione (superficiale o interstiziale);
- umidità accidentale (perdite, allagamenti);
- umidità di risalita capillare.

In Figura 1.2, è possibile osservare uno schema dettagliato delle principali cause di umidità e degli effetti da essa derivati.

1.3.2 Tipologie di degrado

I problemi provocati dalla presenza di umidità nelle murature sono classificabili in:

- estetico-superficiale;
- igienico-sanitari (attacco biologico);
- statico-strutturali;
- causati dal gelo;
- legati alla penetrazione di acqua piovana.

La degradazione superficiale può essere legata a varie cause, quali l'eccessivo raffreddamento delle pareti, la scarsa protezione termica, l'inumidimento delle superfici interne o esterne. L'alterazione delle superfici si presenta in molteplici modi, classificati dalla *Commissione NorMal* nell'*Abaco dei Degradi* nelle Raccomandazioni 1/88 [7].

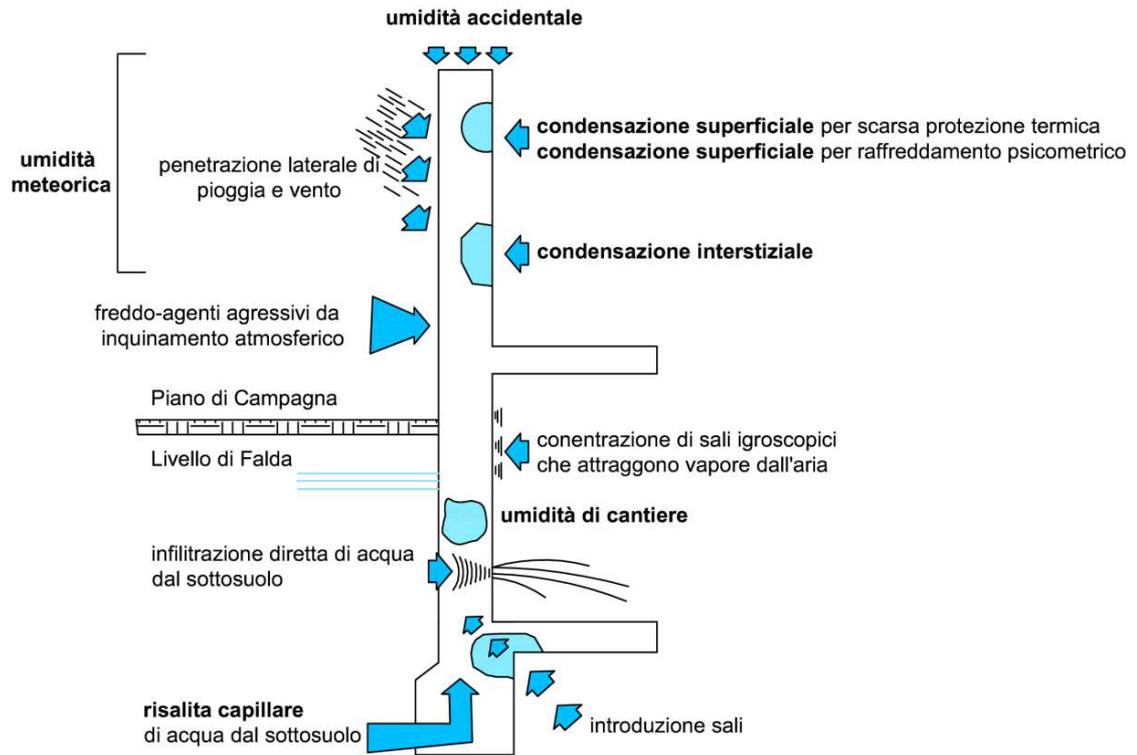


Figura 1.2 – Origine dell'umidità nelle chiusure verticali (appunti del corso di Restauro, Prof. De Tommasi, Politecnico di Bari).

Fra le varie tipologie di degrado sono annoverabili distacco dell'intonaco, efflorescenze, alterazioni cromatiche legate anche a termoforesi o a insorgenza di muffe o alghe (Figura 1.3), e formazione di ghiaccio in facciata.



Figura 1.3 – Alterazioni cromatiche sull'intonaco di una struttura in calcestruzzo, in una chiesa, dovuti alle differenti condizioni di umidità superficiale (diapositiva del corso base di WUFI[®], Fraunhofer IBP).

I problemi igienico-sanitari sono causati dall'alta concentrazione di umidità nell'aria interna e al contempo da temperature superficiali basse, che favoriscono la formazione di muffe e funghi (Figura 1.4). Le cattive condizioni ambientali creano situazioni non confortevoli se non addirittura nocive per le persone che abitano questi locali. In particolare, i luoghi in cui è più facile avere formazione di muffa sono gli angoli, in corrispondenza di ponti termici o in generale dove la concentrazione di umidità è più alta e la temperatura più bassa. In Figura 1.5 si nota come, in un'abitazione, il rischio è più alto nelle camere da letto (normalmente meno riscaldate rispetto agli altri ambienti), dove un ricambio d'aria eccessivo non porta maggiori benefici, bensì abbassa la temperatura interna, aumentando la possibilità d'insorgenza di muffe.



Figura 1.4 – Crescita microbiologica dovuta alle temperature superficiali basse negli angoli (diapositiva del corso base di WUFI®, Fraunhofer IBP).

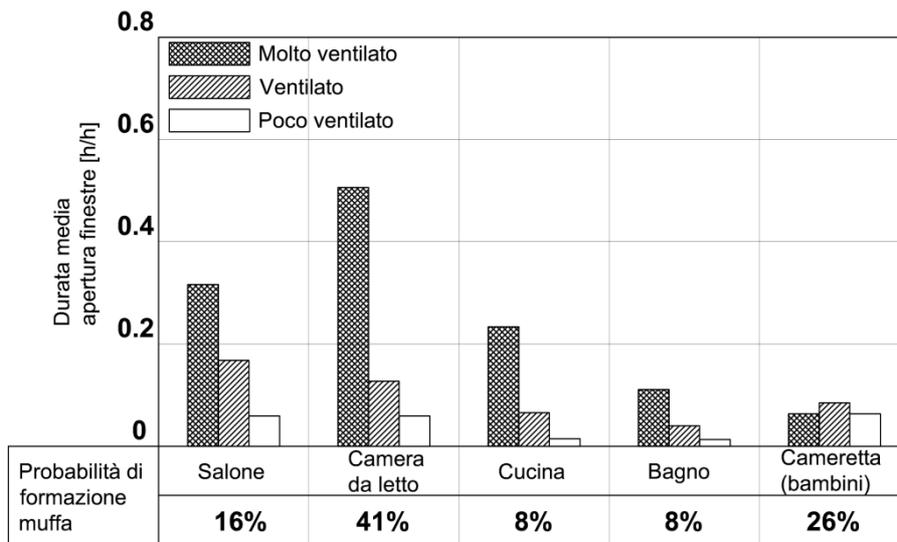


Figura 1.5 – Rischio di formazione di muffa a seconda dell'ambiente e del tempo di ventilazione delle stanze (diapositiva del corso base di WUFI®, Fraunhofer IBP).

La muffa può formarsi anche sul lato freddo dell'isolante interno, a causa della caduta del gradiente di temperatura fra interno ed esterno in climi freddi, con conseguente formazione di umidità di condensa. La possibilità di formazione di condensa interstiziale aumenta se il coibente non aderisce perfettamente alla parete, se il collante è stato applicato per punti e non in modo omogeneo (Figura 1.6) o se la malta utilizzata assorbe molta acqua (come nel caso della malta di gesso).



Figura 1.6 – Muffa nascosta sul lato freddo dell'isolante interno, applicato con punti singoli di malta (diapositiva del corso base di WUFI[®], Fraunhofer IBP).

I dissesti statico-strutturali si presentano a seguito di un contatto prolungato con l'acqua, che può provocare degenerazioni fisiche, chimiche o elettro-chimiche di diverso genere, come la corrosione dei metalli o lo sfarinamento di materiali come il tufo, con conseguente diminuzione della resistenza meccanica della struttura.

I problemi dovuti al gelo sono anch'essi causati dalla presenza di acqua nella parete che congela, nel caso di temperature inferiori a 0 °C, creando così delle sovrappressioni all'interno del materiale. In Figura 1.7 si ha un esempio di tale situazione nel caso di materiali in laterizio: la formazione di ghiaccio avviene a circa 1-2 cm dalla superficie esterna, dove massimo è l'accumulo d'acqua.



Figura 1.7 – Esempio di degrado dovuto all'attacco del gelo (diapositiva del corso base di WUFI[®], Fraunhofer IBP).

Tale processo è favorito dall'applicazione di un isolante interno, che blocca il normale processo di asciugamento della parete nel periodo estivo, intrappolando l'acqua, che congela poi nel periodo invernale (Figura 1.8).

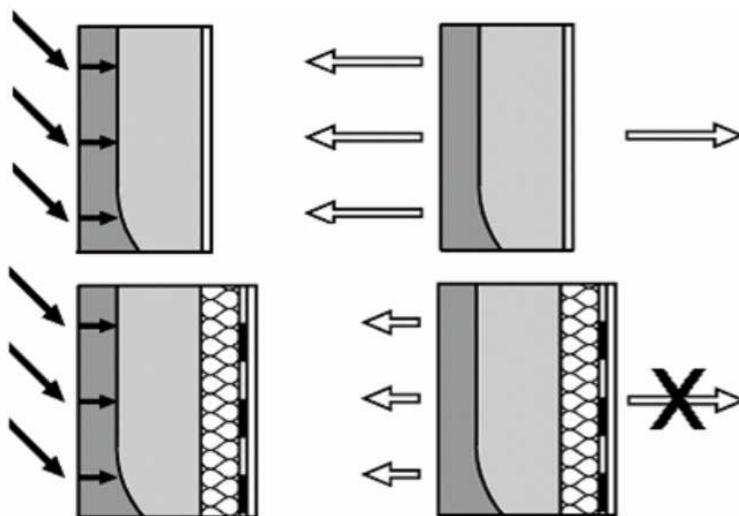


Figura 1.8 – Processo di bagnamento e asciugamento della parete prima e dopo l'applicazione dell'isolante interno (diapositiva del corso base di WUFI[®], Fraunhofer IBP).

Nel caso della penetrazione di acqua piovana all'interno della struttura si possono avere ingenti problemi, qualora i materiali siano molto sensibili all'acqua e la messa in opera dello strato isolante non sia stata perfetta. Il danneggiamento della parete solitamente non è immediato, ma si presenta dopo anni, nelle zone in genere meno protette, come vicino alle aperture. In Figura 1.9 è possibile osservare un esempio dei danni occorsi a una chiusura con isolamento a cappotto, in corrispondenza di un davanzale.



Figura 1.9 – Infiltrazioni di acqua piovana alle spalle dell'isolamento a cappotto di una parete, in corrispondenza di un davanzale (diapositiva del corso base di WUFI[®], Fraunhofer IBP).

1.4 Quadro legislativo e normativo

A partire dagli anni '90, il crescente interesse per la questione del risparmio energetico e l'acuita sensibilità per i problemi descritti in § 1.3.2 ha portato l'Italia a promulgare una serie di leggi, completate dalla normativa tecnica internazionale, volte a regolamentare le prestazioni energetiche degli edifici e i conseguenti interventi di risanamento. La Figura 1.10 illustra l'evoluzione di legislazione e normativa italiana e come queste siano state modificate secondo le sempre maggiori esigenze relative alle prestazioni energetiche degli edifici.

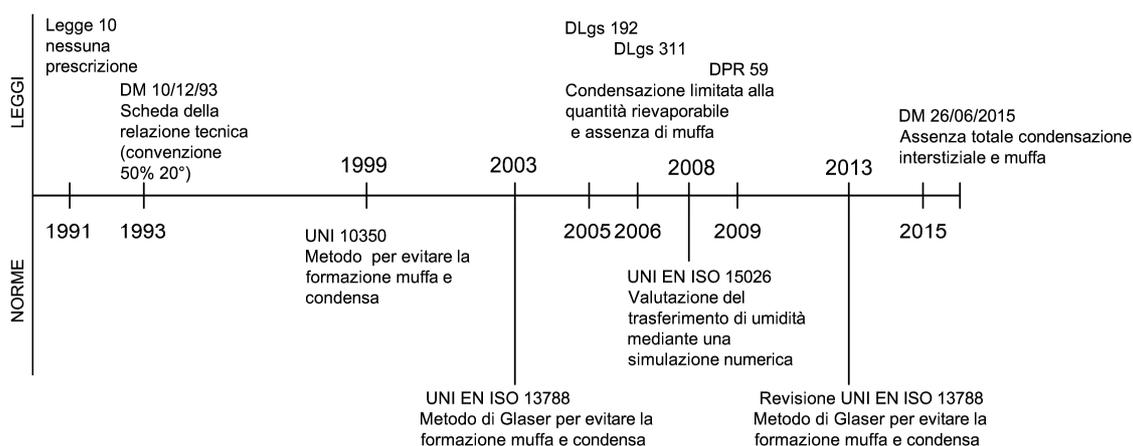


Figura 1.10 – Evoluzione della legislazione e normativa italiana in merito alle verifiche igrotermiche.

1.4.1 La legislazione italiana

A seguito della Direttiva Europea 2010/31/ UE [2], è stato varato il DM del 26 giugno 2015 [8], che stabilisce le nuove modalità di calcolo delle prestazioni energetiche degli edifici, nonché le nuove prescrizioni e condizioni per migliorarle.

Esso prende le mosse dal DPR 26 agosto 1993, n. 412 [9], il quale assegna a ogni comune italiano una zona climatica, secondo la temperatura media annua. Le zone climatiche identificate da tale decreto sono sei, contraddistinte dalle prime lettere dell'alfabeto A, B, C, D, E ed F, passando dalla zona più calda alla più fredda. La suddivisione è effettuata in funzione dei cosiddetti *Gradi Giorno* (GG). Questi sono definiti come la somma, estesa a tutti i giorni di un periodo annuale convenzionale di riscaldamento, delle sole differenze positive giornaliere tra la temperatura ambiente, convenzionalmente fissata a 20 °C, e la temperatura media esterna giornaliera.

Il DM 26/06/2015 riprende dunque quanto espresso dal DPR 412/93 [9], per definire, in base alle zone climatiche, requisiti energetici minimi degli edifici, quali: numero massimo di ore giornaliere in cui è consentita l'accensione degli impianti di riscaldamento, efficienza media degli impianti e limiti massimi relativi alla trasmittanza termica U delle strutture opache. Tali criteri sono da applicarsi a edifici, destinati a civile abitazione, sia civili che pubblici, sia nuovi che esistenti, ma, nel

caso siano di nuova costruzione, sono imposte limitazioni più rigide che non per quelli sottoposti a ristrutturazione (giustificando nuovamente la scelta del recupero). Pertanto, nel seguito sono riportati solo i limiti di trasmittanza termica per strutture opache verticali nel caso di riqualificazioni energetiche ⁴, visibili in Tabella 1.2.

Tabella 1.2 – Trasmittanza termica U [W/m²K] massima delle strutture opache verticali, verso l'esterno, soggette a riqualificazione energetica (Tabella 1 dell'Appendice B del DM 25/06/2015 [8]).

Zona climatica	2015	2019-21
A e B	0.45	0.40
C	0.40	0.36
D	0.36	0.32
E	0.30	0.28
F	0.28	0.26

Questi requisiti energetici minimi degli edifici sono accompagnati da altre prescrizioni specifiche per l'involucro edilizio. A tal proposito è posta particolare attenzione alla valutazione dei ponti termici e alla verifica igrometrica delle chiusure opache, al fine di massimizzare il comfort igrotermico interno, il risparmio energetico, ed evitare al contempo problemi di durabilità, quali marcescenza del legno, proliferazione di muffe, attacco del gelo e corrosione degli elementi metallici.

Lo stesso DM [8] riporta, all'allegato 1, art. 2.3 comma 2, le prescrizioni per le verifiche igrometriche: *“Nel caso d'intervento che riguardi le strutture opache delimitanti il volume climatizzato verso l'esterno, si procede in conformità alla normativa tecnica vigente (UNI EN ISO 13788 [10]), alla verifica dell'assenza:*

- *di rischio di formazione di muffe, con particolare attenzione ai ponti termici negli edifici di nuova costruzione;*
- *di condensazione interstiziale”.*

Il nuovo decreto impone dunque la totale assenza di condensa interstiziale, vincolo assai più severo rispetto alla legislazione precedente, rappresentato dal DPR n. 59 del 2009 [11] (in precedenza DLgs n.192 del 2005 [12], integrato in seguito dal DLgs n. 311 del 2006 [13]). Questo DPR all'articolo 4, impone infatti che: *“sia verificata l'assenza di condensazioni superficiali e che le condensazioni interstiziali delle pareti opache siano limitate alla quantità rievaporabile secondo la normativa vigente”*, rappresentata dalla UNI EN ISO 13788 [10] (per i dettagli si veda § 1.4.2).

⁴ Nella tabella in esame sono riportati i valori massimi di U da non superare per ciascuna zona climatica. Il DM 26/06/2015 specifica che tali restrizioni valgono per le ristrutturazioni di tutti gli edifici, a partire dal 1 luglio 2015. Successivamente, dal 1 gennaio 2019, si applicheranno limitazioni più rigide per gli edifici pubblici e, dal 1 gennaio 2021, per tutti gli altri edifici.

Quanto imposto dal DM 26/06/2015 rappresenta un problema sia fisico, sia giuridico. Riguardo al primo, è difficile avere una struttura che non contenga acqua, a meno di non ricorrere massicciamente all'uso di barriere al vapore. I materiali igroscopici, inoltre, sono in grado di accumulare acqua (non necessariamente di condensa) al loro interno, senza per questo riceverne dei danni. Ad avvalorare questa tesi, la normativa europea, così come quella tedesca e inglese, ammettono la presenza di condensa e pongono dei limiti sulla quantità di acqua massima ammissibile, come mostrato in Tabella 1.3. Per quantità maggiori rispetto a quelle indicate, si ha un contenuto di acqua in fase liquida tale da permetterne lo scorrimento sulla superficie dei materiali, coinvolgendo così altri punti delle chiusure potenzialmente asciutti. Dal punto di vista giuridico, infine, il decreto è relativamente nuovo e non chiarisce ancora se le prescrizioni siano applicabili esclusivamente alle chiusure verificate col *metodo di Glaser* o anche con altre procedure di calcolo (illustrate in § 1.5).

Tabella 1.3 – Normativa tedesca, inglese ed europea a confronto sulla quantità di condensa massima ammissibile (diapositiva del corso base di WUFI[®], Fraunhofer IBP).

Norma	Valore limite
EN 13788 (Europa) [10]	200 g/m ²
DIN 4108 (Germania) [14]	500 g/m ²
BS 5250 (Inghilterra) [15]	150 g/m ² per componenti con 23° d'inclinazione 70 g/m ² per componenti con 45° d'inclinazione 30-50 g/m ² per componenti con 90° d'inclinazione (verticali)

1.4.2 La normativa tecnica

Le normative tecniche sono un sistema di supporto alle leggi, le quali trovano la loro concreta declinazione attraverso i metodi e le direttive delle norme. Le principali norme a cui si farà riferimento in questo studio sono: la UNI EN ISO 13788 sul metodo di Glaser [10] (illustrata nel § 1.4.2.1), UNI EN 15026 [16], sui metodi di simulazione numerica (in § 1.4.2.2) e la UNI 10349 [17], sui dati climatici.

1.4.2.1 Il metodo di Glaser secondo la UNI EN ISO 13788

La legislazione italiana sulle prestazioni energetiche degli edifici fa riferimento, per i calcoli igrotermici, alla UNI EN ISO 13788, nelle due versioni del 2003 [10] e del 2013 [18]. Tale norma contiene le procedure di calcolo per la valutazione di formazione di condensa superficiale e interstiziale, dovuta alla diffusione del vapore, nonché la procedura per la determinazione della temperatura superficiale interna minima di una chiusura ($v_{si,min}$), al di sotto della quale è possibile la formazione di muffa [19].

La valutazione della formazione di condensa interstiziale è affidata, nella norma, al modello di calcolo noto come *metodo di Glaser*, un procedimento semplificato basato sul trasporto di umidità per pura diffusione in regime stazionario monodimensionale. Tale metodo è detto semplificato perché, oltre a considerare esclusivamente condizioni al contorno costanti di temperatura e umidità relativa, trascura, [20]:

- la possibilità di accumulo di umidità (igroscopicità) o calore nei materiali;
- la presenza e l'asciugamento dell'umidità di costruzione;
- la dipendenza di alcune proprietà dei materiali dall'umidità e dalla temperatura;
- il trasporto capillare di acqua liquida nei materiali;
- l'umidità di risalita capillare;
- lo scambio di calore latente;
- i moti convettivi nelle intercapedini d'aria e attraverso le fessure;
- gli eventi meteorologici quali irraggiamento solare, vento e pioggia battente.

Come evidenza [21], conscia di detti limiti, la stessa norma nel paragrafo introduttivo chiarisce che: *“la trasmissione del vapore all'interno delle strutture edilizie è un processo molto complesso e la conoscenza dei suoi meccanismi, delle proprietà dei materiali, delle condizioni iniziali e al contorno è spesso insufficiente, inadeguata e ancora in via di sviluppo. Perciò la presente norma propone metodi di calcolo semplificati, basati sull'esperienza e sulle conoscenze comunemente accettate. La standardizzazione di questi metodi di calcolo non esclude l'uso di metodi più avanzati. I metodi di calcolo utilizzati forniscono in genere risultati cautelativi e quindi, se una struttura non risulta idonea secondo questi in base ad un criterio di progettazione specificato, possono essere utilizzati metodi più accurati che ne dimostrino l'idoneità”*.

1.4.2.2 Le simulazioni dinamiche secondo la UNI EN 15026

La procedura di calcolo in grado di superare i limiti del *metodo di Glaser* è attualmente contenuta nella norma UNI EN 15026 “Prestazione termoigrometrica dei componenti e degli elementi di edificio – Valutazione del trasferimento di umidità mediante una simulazione numerica” [16].

Tale procedura permette l'analisi di fenomeni quali (Figura 1.11) [22]:

- la condensazione interstiziale in regime variabile;
- l'influenza dell'irraggiamento sulla migrazione del vapore;
- l'influenza della pioggia sulla migrazione del vapore;
- i fenomeni legati all'asciugatura delle strutture;
- il comportamento dell'utenza.

Un grande vantaggio delle simulazioni dinamiche è la possibilità di analizzare un fenomeno complesso in piccoli intervalli temporali [23], staccandosi dal calcolo medio mensile della UNI EN ISO 13788 [10]. È così possibile valutare:

- i tempi di asciugatura dei materiali;
- la corretta applicazione di membrane impermeabilizzanti o freni al vapore;
- la variazione della trasmittanza in funzione dell'umidità relativa;
- la condensa interstiziale nei singoli strati, con verifica delle condizioni limite di ciascun materiale.

Nella Figura 1.12 sono evidenziate le principali differenze fra il regime dinamico e il regime variabile, le cui procedure di calcolo sono spiegate nel paragrafo § 1.5.

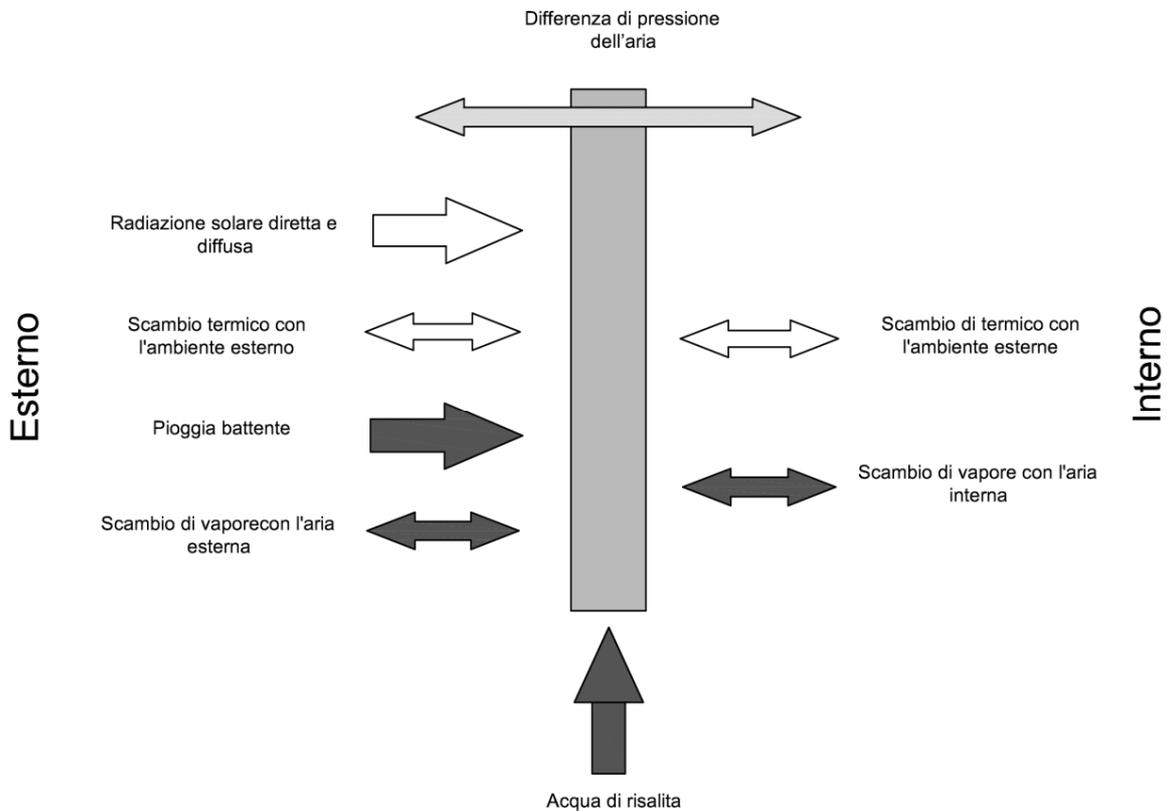


Figura 1.11 – Fattori considerati nel calcolo igrotermico in regime dinamico [22].

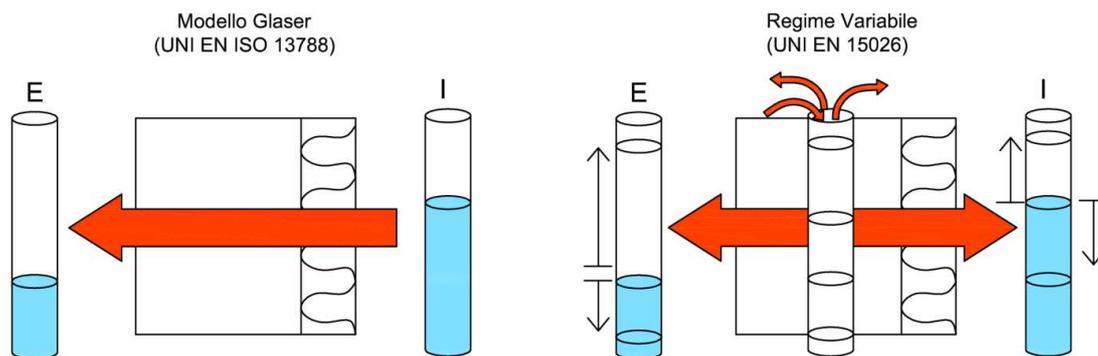


Figura 1.12 – Regime stazionario e variabile a confronto. Nell'immagine di destra le condizioni all'interno e all'esterno sono variabili, inoltre la struttura può accumulare e rilasciare umidità [23].

1.4.2.3 Dati climatici secondo la UNI 10349

Come già accennato nel § 1.4.1, il DM 26/06/2015 [8] fa riferimento ai *Gradi Giorno* (GG), per definire le zone climatiche italiane. Il calcolo dei *Gradi Giorno* si esegue valutando giorno per giorno, per ogni località, la differenza della temperatura interna, fissata a 20 °C e la temperatura media esterna giornaliera, reperibile, per ogni capoluogo di provincia, nella Norma UNI 10349 del 2016 [17] (in precedenza UNI 10349 del 1994 [24]).

Differentemente dalla prima, la versione del 2016 [17] si basa sui dati orari di un anno tipo definito dall'*Agenzia Nazionale per le Nuove Tecnologie, l'Energia e lo Sviluppo Economico Sostenibile* (ENEA) e dal *Comitato Termotecnico Italiano* (CTI), che hanno presentato un aggiornamento dei dati climatici nazionali e hanno determinato i dati medi mensili di alcune variabili climatiche. Nonostante i dati siano orari, purtroppo non sono utilizzabili per le simulazioni dinamiche, poiché mancano informazioni sulla quantità di pioggia e sulla direzione del vento (tali dati non servono per il calcolo energetico, cui la norma è destinata, e dunque sono stati omessi).

La versione 2016 della UNI 10349, ha di fatto innalzato in molte città dell'Italia meridionale il valore dei GG. Questo fatto, permanendo la classificazione introdotta dal DPR 412 del 1993 [9], ridurrebbe le zone climatiche da sei (A, B, C, D, E ed F) a quattro (C, D, E ed F), accorpando alla C la A (in cui rientravano ad esempio Pantelleria, Lampedusa, Linosa e Porto Empedocle) e la B (in cui rientravano ad esempio Agrigento, Catania, Crotona, Messina, Palermo, Reggio Calabria, Siracusa e Trapani). In questo modo in molte città dell'Italia meridionale, in zone relativamente più calde, si permetterebbe l'accensione dei sistemi di riscaldamento per periodi più lunghi (con conseguente maggiore consumo di energia). Nello stesso tempo, la nuova UNI 10349 ridurrebbe le zone F (Trento e Cuneo passerebbero dalla zona F alla zona E), portando un notevole risparmio energetico nel nord dell'Italia. Si nota dunque come il quadro giuridico italiano sul risparmio energetico sia ancora in fase di evoluzione e sperimentazione, e che, ad oggi, non abbia ancora raggiunto un assetto ideale. Un confronto tra le zone climatiche risultanti dalla combinazione del DPR 412:93 e le due versioni della UNI 10349 è visibile in Figura 1.13.

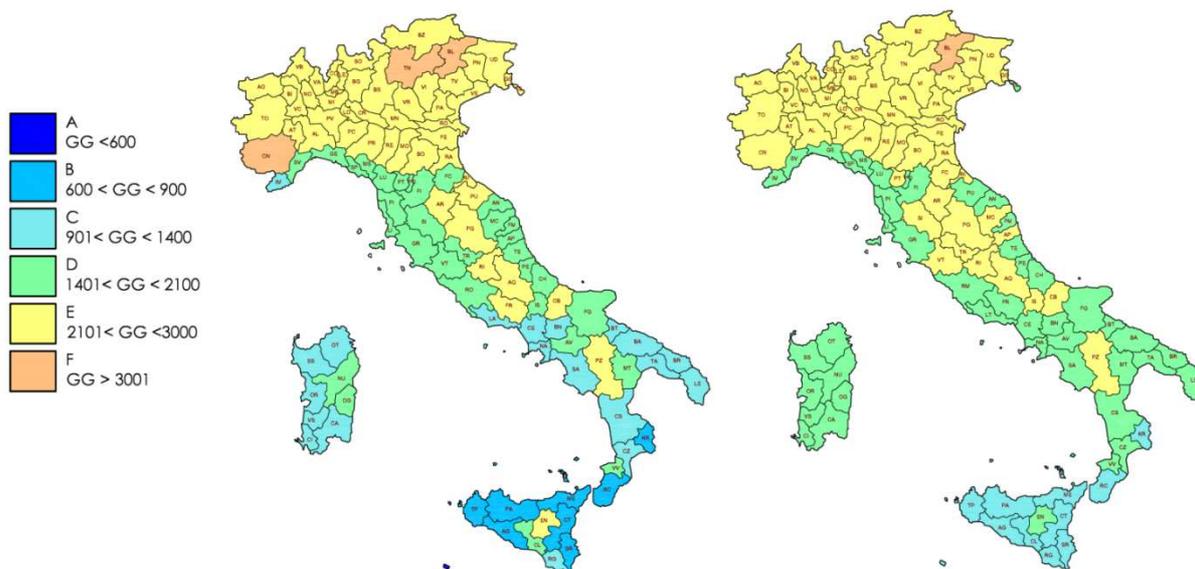


Figura 1.13 – UNI 10349 del 1994 [24] e del 2016 [17] a confronto, per capoluoghi di provincia.

1.4.3 Raccomandazioni WTA

Oltre al quadro normativo e giuridico italiano, è importante conoscere le linee guida dell'*International Association for Science and Technology of Building Maintenance and Built Heritage Conservation* (WTA). Tale associazione si propone di promuovere la ricerca e la sua applicazione pratica nel campo della manutenzione degli edifici e la conservazione dei monumenti storici. Le linee guida WTA sono documenti regolamentati per la riparazione e la ristrutturazione di edifici esistenti e il restauro del tessuto edilizio storico.

Di particolare interesse per le verifiche igrotermiche è la WTA 6-5 del 2014 [25], sui sistemi d'isolamento interno. Questa raccomanda che:

- Il lato freddo dell'isolante non superi valori di umidità relativa superiori a 95% e temperature superficiali inferiori a 0 °C, per evitare formazione di ghiaccio.
- Il lato caldo dell'isolante non superi valori di umidità relativa superiori a 80% e temperature superficiali superiori a 13 °C, per evitare la formazione di muffa.
- Nel caso di costruzioni lignee, sono ammesse quantità minime di umidità, secondo la DIN 68800 (normativa tedesca) [26], al fine di mantenere intatte le caratteristiche di resistenza del legno. Tali limiti sono visibili in Tabella 1.4.
- Per interventi in cui sia previsto isolamento dall'interno, l'intonaco esterno e i rivestimenti esterni devono avere spessore equivalente d'aria (s_d) e caratteristiche di permeabilità al vapore e tenuta all'acqua tali per cui sia verificata la seguente relazione:

$$s_d * A \leq 0.1 \text{ kg/m}\sqrt{\text{h}} \quad (1)$$

Tabella 1.4 – Quantità massima di umidità [M.-%] ammessa nel legno e nei materiali lignei [26].

Umidità ammessa	Legno massiccio	Materiali lignei
Permanentemente	20	18
Durante il primo anno	22	20

A proposito della marcescenza del legno, la bozza della nuova WTA-Merkblatt 6.8 [27] considera che i limiti di umidità ammessi dipendano anche dalla temperatura, come illustrato in Figura 1.14. Nel grafico di sinistra è mostrata la dipendenza dell'umidità dell'aria dei pori del legno in funzione della temperatura. La linea tratteggiata mostra la curva di umidità relativa limite, al di sotto della quale la marcescenza del legno non è fisicamente possibile. In particolare si osservi come, a 1 °C, la marcescenza sia possibile solo con valori di UR superiori a 95%, mentre a 30 °C basti appena un valore di 86% UR per avere la stessa situazione. Tale criterio è universale e vale per ogni specie lignea. Nel grafico di destra si può osservare invece il contenuto d'acqua in funzione della temperatura, calcolato a titolo di esempio per una specifica essenza lignea e per una particolare curva di assorbimento igroscopico: qui il valore limite del contenuto d'acqua varia tra 25% e 20% in massa rispettivamente per temperature di 1 °C e 30 °C.

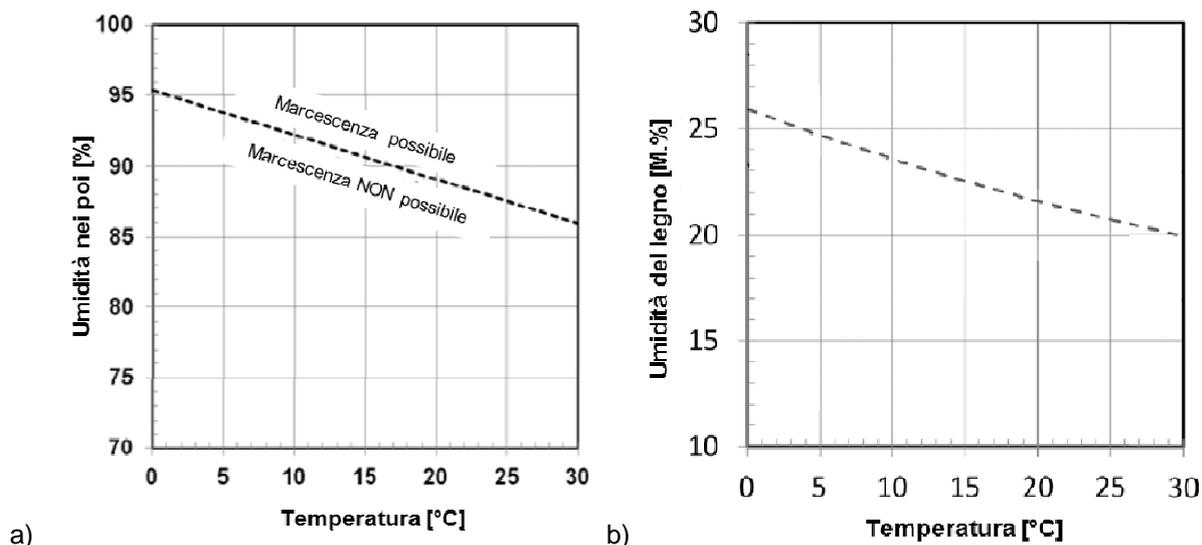


Figura 1.14 – Dipendenza della marcescenza del legno in funzione di temperatura e umidità: a) umidità relativa dell'aria contenuta nei pori del legno in funzione della temperatura; contenuto d'acqua per una specifica curva di assorbimento igroscopico in funzione della temperatura [27].

Infine, con riferimento alle caratteristiche degli intonaci per rivestimenti di facciate isolate dall'interno, la WTA 6-5 ha ridotto i valori ammissibili di permeabilità al vapore s_d e assorbimento d'acqua A. Tali modifiche sono riportate in Figura 1.15: l'area in verde rappresenta i nuovi requisiti, mentre l'area in giallo indica i limiti imposti in Germania dalla DIN 18550-1 [28].

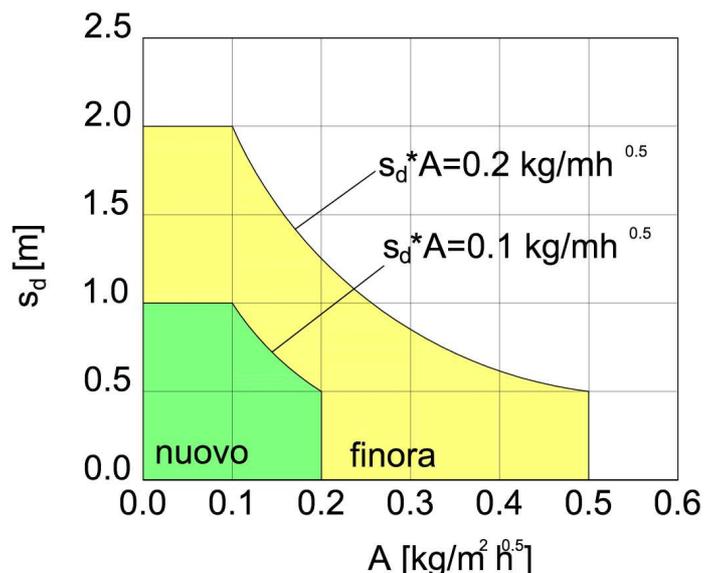


Figura 1.15 – Requisiti minimi degli intonaci per la protezione della facciata dalla pioggia battente – area in giallo (*Diagramma di Künzdel del 1985, poi ripreso dalla DIN 18550-1 [28]*). L'area in verde fa riferimento ai nuovi requisiti per intonaci di facciate isolate dall'interno.

1.5 Metodi di valutazione igrotermica

Una volta chiarito il quadro giuridico, è importante capire quali sono e come funzionano i metodi di valutazione igrotermica. Oltre ai metodi empirici (Figura 1.16), come le prove di laboratorio e le prove in situ, i metodi analitici, quali il *metodo di Glaser* e le simulazioni numeriche, sono le soluzioni migliori per le analisi igrotermiche.

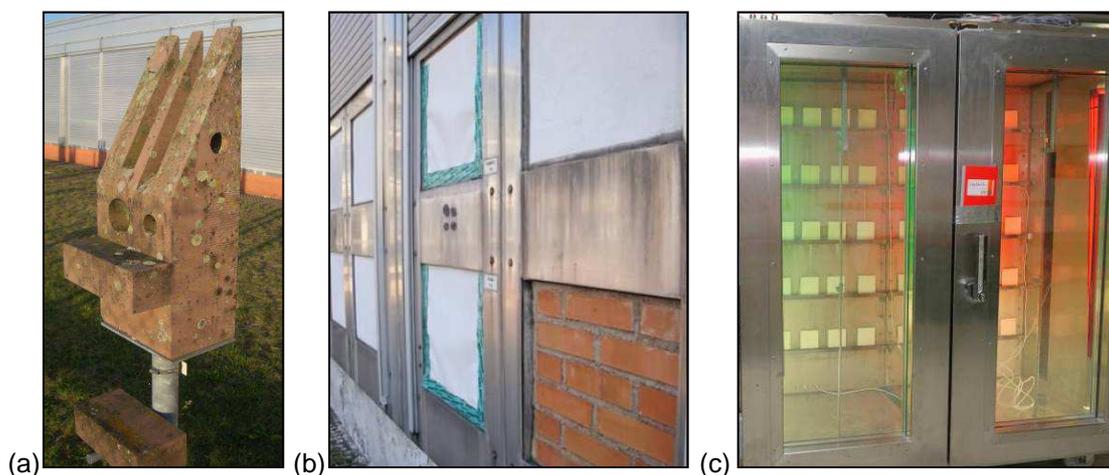


Figura 1.16 – a) Esposizione totale all'ambiente esterno di provini di pietra; b) esposizione di provini di vari materiali, esposti da un lato al clima locale e dall'altro a un clima interno stazionario; c) esposizione di provini d'intonaco a cicli artificiali di bagnamento / asciugamento e irraggiamento (diapositiva del corso base di WUFI®, Fraunhofer IBP).

Questi ultimi sono preferibili ai primi, in quanto:

- le prove in situ (come termografia, georadar, igrometri, ecc.) sono costose e richiedono lunghi tempi di monitoraggio;
- le prove di laboratorio, oltre ai costi e alle tempistiche, non producono risultati realistici, in quanto le condizioni climatiche interne sono stazionarie.

I metodi analitici, per contro, possono essere applicati a qualsiasi materiale e condizione climatica, senza dover rispettare le tempistiche proprie delle prove sperimentali. L'affidabilità dei risultati dei metodi analitici è comunque garantita dalla cosiddetta validazione, verificando cioè la congruenza di tali risultati a quelli ottenuti, in situazioni analoghe, mediante test di laboratorio e prove in situ. Ciò garantisce che l'esito dei metodi analitici sia sempre affidabile e realistico.

Di seguito sono descritte le procedure di calcolo e i meccanismi fisici che li regolano.

1.5.1 Metodo tradizionale: procedura di calcolo semplificata (*Glaser*)

Il *metodo di Glaser* è una verifica igrotermica analitica semplificata, basata sul trasporto di umidità per pura diffusione in regime stazionario monodimensionale.

I dati necessari per il calcolo, come descritto nella UNI EN ISO 13788 [10], sono:

- conducibilità termica (λ) o la resistenza termica (R);
- fattore di resistenza al vapore (μ) o lo spessore equivalente di aria (s_d);
- dati climatici delle località: temperatura esterna (ϑ_e) e umidità relativa esterna (φ_e);
- temperatura interna (ϑ_i) e umidità relativa interna (φ_i);
- resistenze termiche superficiali R_{si} e R_{se} .

Per la determinazione della temperatura superficiale critica, si sceglie il valore massimo ammissibile dell'umidità interna superficiale (φ_{si}) e in seguito si calcola la temperatura interna superficiale minima ($\vartheta_{si, min}$) attraverso le relazioni:

$$p_i = \varphi_{si} p_{sat}(\vartheta_{si}) \quad (2)$$

$$v_i = \varphi_{si} v_{sat}(\vartheta_{si}) \quad (3)$$

Si calcola il fattore di temperatura minimo $f_{Rsi, min}$:

$$f_{Rsi, min} = \frac{(\vartheta_{si, min} - \vartheta_e)}{(\vartheta_i - \vartheta_e)} \quad (4)$$

Si deve quindi progettare il componente edilizio in modo che:

$$f_{Rsi} > f_{Rsi, min} \quad (5)$$

Per la determinazione della condensa interstiziale si calcola la temperatura superficiale di ogni strato della parete (ϑ_k), la pressione di saturazione ($p_{\text{sat}}(\vartheta_k)$) per ogni interfaccia e la pressione parziale p_k . Infine, graficamente o analiticamente, si definisce se è presente condensa nella chiusura analizzata.

In conclusione il metodo di Glaser considera solo la condensa invernale e l'evaporazione estiva, basandosi sulla diffusione del vapore. Il suo limite è quindi una sovrastima del rischio di formazione di condensa e una ridotta applicabilità. La UNI EN ISO 13788 [10] segnala infatti: *"I risultati saranno più affidabili per strutture leggere, poco permeabili all'aria, che non contengono materiali che possono accumulare grandi quantità di acqua. Essi saranno meno affidabili per strutture con grande capacità termica e igroscopica e che sono più permeabili all'aria"*. È necessaria, quindi, in caso d'interventi d'isolamento dall'interno e nel caso di utilizzo di barriere al vapore, un'analisi approfondita in regime variabile.

1.5.2 Simulazioni igrotermiche dinamiche

Per comprendere meglio cosa sono e in cosa consistono le simulazioni dinamiche, è importante capire i principi sui quali esse si basano. Come mostra la Tabella 1.5, i metodi dinamici fanno riferimento a diversi meccanismi di trasporto, raggruppabili in tre macro sezioni, a seconda delle proprietà e potenziali cui fanno riferimento [29].

I meccanismi più rilevanti per il trasporto di calore e umidità sono descritti nel seguito.

Tabella 1.5 – Elenco dei meccanismi di trasporto di calore, vapore e acqua negli edifici [29].

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
Massa in fase gassosa (vapore)	Diffusione di vapore	Pressione di vapore
	Trasporto molecolare	Pressione di vapore
	Diffusione di soluzione	Pressione di vapore
	Convezione	Gradiente di pressione totale
Massa in fase liquida (acqua)	Conduzione capillare	Suzione capillare
	Diffusione superficiale	Umidità relativa
	Infiltrazione	Gravità
	Flusso idraulico	Gradiente di pressione
	Elettrosmosi/elettrocinesi	Campo elettrico
	Osmosi	Concentrazione ionica

1.5.2.1 Accumulo e trasporto di calore

In fisica tecnica è ben noto il comportamento termico dei componenti di una chiusura in condizioni secche. Künzle [29] spiega, però, come la presenza di umidità influisca sul trasporto e sull'accumulo di energia dei materiali. Di conseguenza, non si può considerare la sola dipendenza del trasporto di calore dalla temperatura, ma si devono valutare anche gli effetti della presenza d'acqua.

Sono di seguito descritti i meccanismi di accumulo di energia e di trasporto di calore e come questi sono influenzati dal contenuto d'umidità.

Accumulo di energia

Il contenuto di energia di un materiale, in condizioni isobariche, è chiamato entalpia, e dipende linearmente dalla temperatura:

$$H = \rho c \vartheta \quad (6)$$

In caso di materiali umidi, si deve aggiungere l'entalpia dell'acqua in essi contenuta, il cui contributo dipende dallo stato fisico in cui l'acqua si trova. Come si vede in Figura 1.17, la capacità di accumulo del vapore è trascurabile rispetto a quella del ghiaccio.

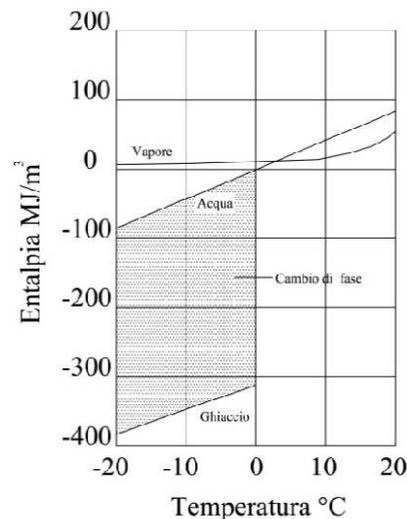


Figura 1.17 – Entalpia propria dei vari stati fisici dell'acqua a pressione atmosferica, in funzione della temperatura [29].

Trasporto di calore

Così come per l'accumulo di energia, la conduzione di calore tiene conto, oltre della capacità termica a secco dei materiali, anche della presenza di umidità. La conduttività λ non dipenderà, dunque, come nel caso di materiale secco, dalla sola temperatura, come descritto dall'equazione (7) ma anche dall'umidità, secondo quanto espresso dall'equazione (8):

$$\lambda = -q \frac{\Delta x}{\Delta T} \quad (7)$$

$$\lambda = \lambda_0 \left(1 + b_\lambda \frac{w}{\rho} \right) \quad (8)$$

Il supplemento b_λ indica l'incremento in percentuale di λ , in presenza di umidità. Il valore dipende dal tipo di materiale e dallo stato fisico dell'acqua: il ghiaccio ha una conduzione termica quattro volte superiore rispetto a quella dell'acqua liquida.

Importante è anche il trasporto di calore latente per diffusione, legato al cambio di fase dell'acqua, nel caso in cui, per esempio, la superficie esterna della parete sia bagnata dalla pioggia battente. In questo caso, nel periodo invernale la parete assorbe acqua che, nel periodo estivo, evaporerà passando dallo stato liquido a vapore. Tale cambio di fase produrrà una quantità di calore simile a quella prodotta dalla radiazione solare e quindi non trascurabile, calcolabile attraverso:

$$S_h = h_v \nabla g_v \quad (9)$$

1.5.2.2 Trasporto di umidità

Il meccanismo di trasporto di umidità si distingue in trasporto liquido attraverso le forze capillari e in trasporto di vapore. Entrambi i processi sono generalmente indipendenti l'uno dall'altro, perché il primo ha luogo nei pori più grandi, mentre il secondo sulla superficie dei pori e nei capillari.

Il flusso di vapore ha direzione opposta a quella del gradiente di umidità, ciò significa che si muoverà dalla superficie con UR maggiore a quella con UR inferiore. Questo fa intendere che il potenziale di riferimento sia proprio la pressione parziale di vapore e il flusso può essere così descritto dalla *legge di Fick*:

$$g_v = - \delta_p \nabla p \quad (10)$$

Da comprendere in questa sezione c'è anche la diffusione in soluzione, che si riscontra principalmente nei polimeri organici come la cellulosa. In questi materiali l'acqua crea i suoi propri pori e si ha un movimento delle molecole del polimero.

Il flusso liquido invece avviene nei micro pori e si determina attraverso l'*equazione di Krischer*. Questo fenomeno, che dipende dalla suzione capillare e dalla UR, si riscontra quando il materiale di una chiusura raggiunge la saturazione. Da questo momento comincia la migrazione di acqua verso gli strati più secchi, così che il flusso avrà direzione opposta a quella del flusso di vapore.

In seguito Künzel [29] ha poi evidenziato come questo fenomeno si divida ulteriormente in due fasi: l'assorbimento e la redistribuzione. L'assorbimento descrive la presa capillare dell'acqua quando la superficie è interamente bagnata, la seconda invece è un processo più lento che descrive la propagazione dell'acqua una volta terminato l'assorbimento.

Oltre a questi due meccanismi è da includere nel trasporto liquido la diffusione superficiale. Questo fenomeno si verifica con la formazione di un film d'acqua sulla superficie dei pori, che con l'aumento dell'umidità tendono a saturarsi. Potrebbe sorgere il dubbio se considerare tale meccanismo parte del trasporto liquido o di quello di vapore, in quanto la diffusione principale avviene nei macropori già con il 30% UR in direzione opposta al flusso del vapore. Ciò che permette di classificare la diffusione superficiale come trasporto liquido è il suo potenziale guida, che non è la pressione parziale ma l'umidità relativa.

1.5.2.3 Caratterizzazione del flusso termico e di umidità

Dopo aver analizzato i singoli meccanismi di trasporto, Künzel ha definito le equazioni di bilancio complessive per le simulazioni dinamiche [29]:

$$\frac{\partial H}{\partial T} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \cdot \nabla T) + h_v \cdot \nabla(\delta_p \cdot \nabla(\varphi p_{sat})) \quad (11)$$

$$\frac{\partial w}{\partial \varphi} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \nabla \cdot (D_\varphi \nabla \varphi + \delta_p \cdot \nabla(\varphi p_{sat})) \quad (12)$$

Tali equazioni e le procedure di calcolo sono state poi validate confrontandole con le misure ottenute in laboratorio e con le prove in situ svolte dall'Istituto di Fisica Tecnica del Fraunhofer, e implementato nel programma di simulazioni dinamiche WUFI[®], che permette un calcolo realistico del trasporto mono e bidimensionale del calore e dell'umidità nelle pareti.

Il processo di validazione del modello consiste nella:

- definizione delle caratteristiche dei materiali (Figura 1.18 a);
- registrazione oraria delle condizioni al contorno mediante stazione meteorologia (Figura 1.18 b);
- lettura periodica o continuata del contenuto totale di acqua (pesature) e profili di umidità (scansione NMR) (Figura 1.18 c).

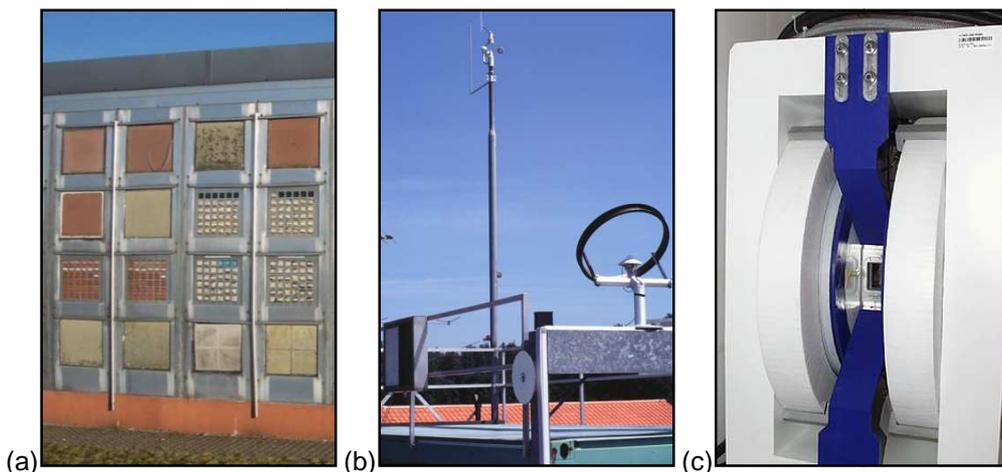


Figura 1.18 – (a) Provini esposti su un lato ad ambiente controllato, sull'altro all'ambiente esterno; (b) stazione meteorologica IBP; (c) strumentazione per scansioni NMR (diapositive del corso base di WUFI®, Fraunhofer IBP).

Tale processo si conclude con la validazione, confrontando cioè i risultati delle sperimentazioni in situ e in laboratorio con quelli simulati con WUFI® per verificarne l'attendibilità. In Figura 1.19 è possibile osservare un esempio di validazione di una simulazione eseguita per una parete di pietra arenaria: i profili del contenuto di umidità ottenuti col metodo analitico sono confrontati con le scansioni NMR dei provini. Si nota come ci sia una buona corrispondenza fra le curve di distribuzione dell'acqua delle simulazioni e quelle delle sperimentazioni empiriche.

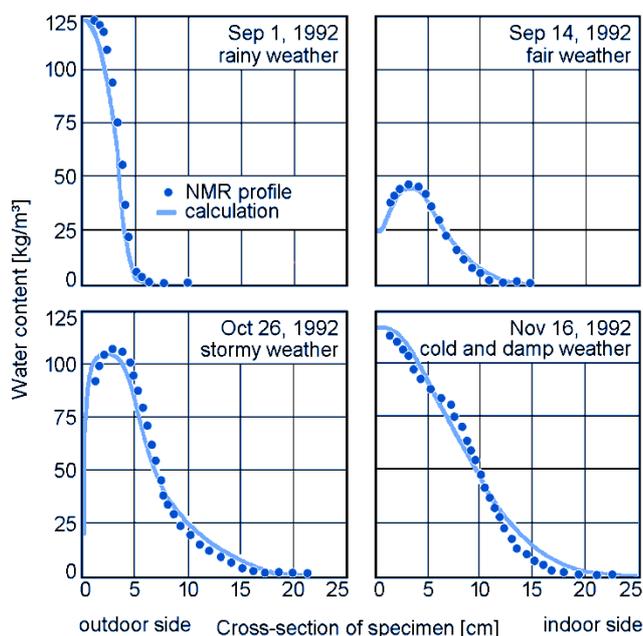


Figura 1.19 – Esempio di validazione del modello di WUFI® attraverso le curve di distribuzione dell'acqua nella sezione di una parete in pietra arenaria (diapositiva del corso base di WUFI®, Fraunhofer IBP).

Il software WUFI® 6, utilizzato per le simulazioni igrotermiche di questo studio, è la versione più recente del programma di simulazione igrotermica sviluppato dal Fraunhofer IBP per la valutazione delle prestazioni igrotermiche delle sezioni dell'involucro edilizio, in regime dinamico monodimensionale.

In particolare, il programma tiene conto di:

- effetto dell'irraggiamento solare;
- umidità di costruzione presente nei materiali;
- ingresso di umidità dovuta all'acqua piovana;
- assorbimento di umidità di risalita;
- condensa estiva e raffreddamento notturno;
- inerzia termica e accumulo di calore;
- effetto di membrane igrovariabili;
- effetti entalpici;
- effetto del contenuto d'acqua sulla conduttività termica.

Il programma però trascura alcuni aspetti, quali:

- strutture multidimensionali;
- fenomeni di trasporto dominanti, come la forza di gravità e la convezione (gli effetti della convezione sono comunque simulati mediante l'introduzione di sorgenti di umidità (§ 2.1.4);
- proprietà materiche dipendenti dal tempo (ritiro, rigonfiamento del legno, ecc.);
- presenza di sali;
- condizioni al contorno molto diverse da quelle usuali (es. in caso d'incendio).

1.5.2.4 Caratteristiche dei materiali

WUFI®, per un corretto funzionamento, richiede alcune informazioni sui materiali, ricavabili sperimentalmente attraverso test in laboratorio. I principali dati sono: densità, porosità, calore specifico, conduttività termica, contenuto d'acqua, resistenza alla diffusione del vapore e coefficienti di trasporto liquido.

Densità apparente ($\rho\rho$)

La densità è il rapporto tra la massa di un materiale e il volume che esso occupa. Nel caso di materiali porosi, si parla di densità apparente. Essa si esprime come:

$$\rho = \frac{m_{secca}}{V_{tot}} \quad (13)$$

Tale proprietà è facilmente calcolabile e non serve particolare accuratezza, ma è molto importante nel calcolo della capacità termica. In generale, materiali molto densi hanno una prestazione estiva migliore, essendo caratterizzati da una buona inerzia termica; viceversa in inverno. Le procedure calcolo per la stima della densità sono descritte in diverse norme a seconda della tipologia del materiale (es. BS EN 1602 [30] per i materiali isolanti, EN 1015-10 [31] per calci e intonaci ed EN 772-4 [32] per i mattoni)

Porosità (ϵ)

La porosità è la porzione di volume occupato dai pori, rispetto al volume totale del materiale e si esprime come:

$$\epsilon = 1 - \frac{\rho_{apparente}}{\rho_{reale}} \quad (14)$$

È necessaria per determinare se un materiale assorbe acqua in forma liquida o gassosa e per poter stimare, di conseguenza, il massimo contenuto di acqua.

Le tecniche di misura sono la saturazione d'acqua sotto vuoto, il porosimetro a mercurio o a gas, il picnometro ad elio.

Calore specifico (c)

Il calore specifico è una proprietà termo-fisica dei materiali e indica la quantità di calore necessaria per aumentare di 1 K la temperatura di 1 kg di materiale. Serve per determinare la capacità di accumulo di un materiale e dipende dalla densità e dalla composizione strutturale del materiale stesso.

È una proprietà nota per la maggior parte dei materiali. Un elenco indicativo è contenuto nella DIN EN 12524 [33] e riassunto in Tabella 1.6. In assenza di informazioni da norme o letteratura, il calore specifico si misura con la calorimetria.

Tabella 1.6 – Calore specifico c [J/kgK] dei materiali più utilizzati.

Materiale	c
Alluminio	900
Ferro/Acciaio	450
Materiali cementizi, laterizi, ecc.	850
Schiume isolanti (EPS, XPS, PU)	1500
Sughero	1700
Legno	2100
Aria	1000
Acqua	4200

Conduttività termica (λ)

La conduttività termica è una proprietà termo-fisica dei materiali che indica il flusso di calore che, in condizioni stazionarie, passa attraverso uno strato di materiale omogeneo dallo spessore di 1 m, per 1 m² di superficie e per una differenza di 1 K fra due facce opposte e parallele dello strato di materiale considerato.

La conduttività termica dipende dalla temperatura, dal contenuto di umidità e dalla densità del materiale (Figura 1.20). Essa si determina con l'ausilio di apparecchiature a piastra calda con anello di guardia (TPS) in accordo con la DIN 52612 [34] e la UNI EN 12664 [35].

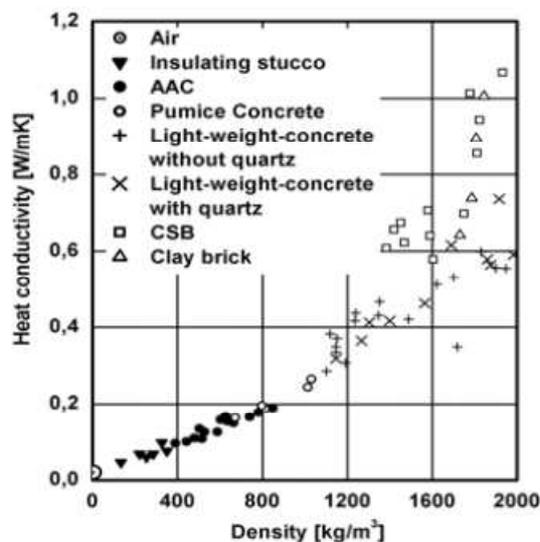


Figura 1.20 – Dipendenza della conducibilità termica dalla densità. Grafico con diversi materiali a confronto (diapositiva del corso base di WUFI®, Fraunhofer IBP).

Resistenza alla diffusione del vapore (μ)

Il fattore di resistenza alla diffusione di vapore è un parametro adimensionale che indica quanto il materiale è più resistente al passaggio del vapore rispetto a uno strato d'aria fermo dello stesso spessore.

Il valore della resistenza al vapore si ottiene in laboratorio attraverso il metodo *dry cup* e *wet cup*, regolamentati dalla EN ISO 12571 [36]. Tali prove consistono nel misurare la variazione di peso di un provino posto in un recipiente, contenente rispettivamente un sale igroscopico (es gel di silice) o acqua (Figura 1.21), e conservato in una camera climatica a temperatura e umidità costanti (23 °C e 50% UR). Da queste prove si ottiene il coefficiente di permeabilità al vapore, correlato alla differenza di peso del campione, da cui poi si ricava la μ . In altre parole, il metodo *dry cup* simula un ambiente riscaldato durante il periodo di piogge che inumidiscono la parete esterna, mentre il *wet cup* misura il vapore entrante nella direzione opposta.

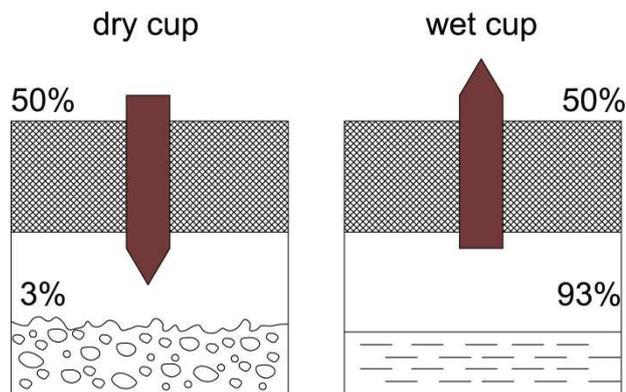


Figura 1.21 – Valori di riferimento dell'umidità relativa nel caso di *dry cut* e *wet cup* (diapositiva del corso base di WUFI®, Fraunhofer IBP).

Molto spesso, nel caso di membrane sottili al posto di μ si utilizza il valore s_d , che si ottiene moltiplicando il valore di resistenza al vapore del materiale per lo spessore del provino espresso in metri. Il valore corrisponde allo spessore di uno strato di aria equivalente che oppone una resistenza uguale a quella del materiale.

Contenuto d'acqua (w)

Il contenuto di acqua è la quantità d'acqua, in fase liquida o gassosa, che può essere immagazzinata in un materiale igroscopico e dipende dall'umidità relativa dell'aria che lo circonda.

Per i materiali igroscopici è possibile tracciare la curva di equilibrio igroscopico e al identificare tre regioni di equilibrio (A, B e C), così come mostrato in Figura 1.22.

La regione A, compresa tra 0 % e 95 % UR, è riconoscibile in tutti i materiali non a contatto diretto con l'acqua (sono gli strati esposti alla pioggia). Il contenuto d'acqua in questa regione è facilmente calcolabile tramite la curva di assorbimento.

La regione B, compresa fra il 95 % UR e il livello di saturazione libera, è chiamata super-igroscopica poiché si raggiunge per effetto della capillarità. La curva di assorbimento in questo caso è più difficile da definire, perché non si può far riferimento al modello classico della risalita capillare, dato che i materiali non hanno pori tondeggianti.

La regione C, al di sopra del livello di saturazione libera, è chiamata di sovra-saturazione e si ottiene solo in laboratorio aumentando artificialmente la pressione esterna. Questo porta a eliminare tutta l'aria nei capillari e a saturare il materiale fino al raggiungimento della saturazione massima.

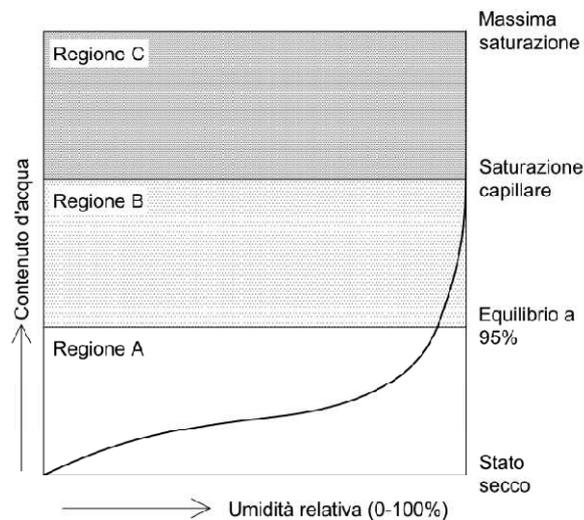


Figura 1.22 – Funzione di equilibrio igroscopico [29].

Dalla correlazione fra contenuto di acqua e UR si ottengono le isoterme di assorbimento igroscopico (note in inglese come *moisture storage function* o *MSF*). Esse si determinano, ad esempio, ponendo campioni di materiali in camera climatica a temperatura costante con umidità relative crescenti, fino al raggiungimento dell'equilibrio, come descritto nella DIN EN ISO 12571 [36]. Di solito si trascura l'isteresi, ovvero la differenza tra la curva di assorbimento e quella di desorbimento, nonché la dipendenza dalla temperatura.

È possibile anche definire la MSF attraverso dei metodi semplificati, come quello delle approssimazioni per due punti (w_{80}, w_f). In questo caso, per determinare analiticamente il contenuto d'acqua ad una determinata UR, si applica la formula:

$$w = w_f \frac{(b-1)\varphi}{(b-\varphi)} \quad (15)$$

In Figura 1.23 si vede come le curve d'assorbimento di diversi materiali, ricavate con tale sistema, siano rappresentative dell'andamento reale delle stesse.

Questo metodo non è però utilizzabile per i materiali lignei e cementizi, poiché le isoterme ottenute dall'approssimazione non rispecchiano l'andamento reale. Si tratta in genere di materiali con contenuto di umidità molto elevato a 80% UR e con l'approssimazione si ottiene una sovrastima del contenuto d'acqua nella regione B. Vi sono poi materiali per i quali non è possibile definire le curve di assorbimento:

- i metalli (idrofili ma non porosi);
- le schiume polimeriche (porose ma non idrofile);
- le schiume di vetro (porose, idrofile ma a celle chiuse e impermeabili).

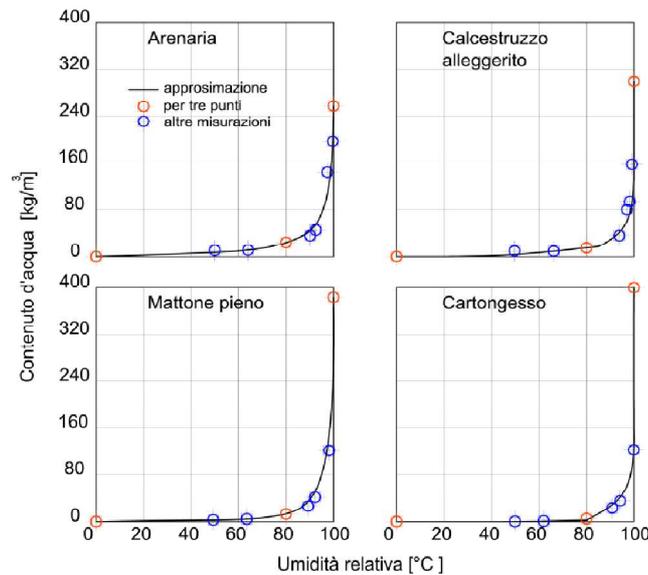


Figura 1.23 – Funzione di accumulo d'umidità di diversi materiali, ottenuta tramite il metodo di approssimazione per due punti.

Coefficienti di trasporto liquido (D_{ws} e D_{ww})

Questi coefficienti calcolano l'assorbimento di umidità di un materiale attraverso una superficie bagnata e sono definiti [37]:

- D_{ws} per il processo di suzione durante la pioggia;
- D_{ww} per il processo di asciugatura.

Questi dati dipendono esponenzialmente dal contenuto di umidità, quindi sono approssimativamente calcolati attraverso le seguenti equazioni:

$$D_{ws}(w) = 3.8 \left(\frac{A}{w_f} \right)^2 1000^{(w/w_f - 1)} \quad (16)$$

$$D_{ww}(w) = \frac{D_{ws}(w)}{10} \quad (17)$$

Tali dati si ottengono tramite prove di assorbimento d'acqua e prove di asciugamento in camera climatica e con la conseguente misura della distribuzione di umidità tramite uno scanner NMR o raggi gamma. La norma di riferimento è la EN ISO 15148 [38].

2 Impostazione delle simulazioni

Questo secondo capitolo illustra le impostazioni adottate per le simulazioni igrotermiche eseguite. Sono forniti cioè gli spessori e materiali delle soluzioni tecniche analizzate, le caratteristiche superficiali, le condizioni iniziali e al contorno. A questo proposito, particolare attenzione è posta nel reperimento e nella selezione dei dati climatici esterni, allo stato attuale della ricerca molto carenti in Italia.

2.1 Definizione delle stratigrafie e dei materiali

Qui sono individuate le principali soluzioni costruttive e le tipologie d'isolante maggiormente usate per il risanamento energetico in Italia. A corredo di tali informazioni sono forniti gli spessori di ogni strato; per i materiali coibenti, esso varia in funzione della zona climatica e della soluzione tecnica stessa, in modo da rispettare i valori massimi ammessi di trasmittanza termica (cfr. Tabella 1.2 e [8]).

2.1.1 Soluzioni tecniche originarie

Per la selezione delle soluzioni tecniche da simulare si sono presi in esame vari modelli di chiusura verticale, caratteristici del patrimonio edilizio italiano esistente fino agli anni '70. La scelta di tale limite non è casuale: infatti, a seguito della crisi energetica del 1973, dovuta all'interruzione dell'approvvigionamento di petrolio dal Medio Oriente, si cominciò a parlare per la prima volta di risparmio energetico, anche in ambito edile. Frutto di tali preoccupazioni è la Legge 373/1976 [39] (in seguito ripresa e modificata dalla Legge 10/1991 [40]), che impone la verifica delle dispersioni di calore nelle chiusure. Si è deciso inoltre di limitare l'analisi delle chiusure alla sola edilizia residenziale, poiché essa è più diffusa delle altre tipologie edilizie e tale destinazione d'uso si mantiene in genere inalterata nel tempo. Tenendo dunque conto di tali premesse, le soluzioni tecniche e gli spessori dei relativi strati sono scelti partendo dall'abaco delle strutture murarie fornito dalla UNI/TR 11552 [41] (in precedenza UNI/TS 11300-1 [42]), valutando al contempo la frequenza con la quale tali tipologie costruttive ricorrono nel panorama edilizio italiano esistente [3].

Sono così individuati sette diversi tipi di chiusura verticale:

- muratura in pietra arenaria,
- muratura in blocchi squadrati di tufo,
- muratura a due teste in mattoni pieni,
- muratura in laterizio forato,
- muratura in blocchi di calcestruzzo alleggerito,
- muratura a cassa vuota con intercapedine d'aria,
- muratura in calcestruzzo armato.

La Figura 2.1 mostra lo schema di ciascuna delle murature scelte. Gli spessori qui riportati sono solo indicativi. Per un elenco puntuale si rimanda all'Appendice (Figura A.1-Figura A.22). Si noti anche come, accanto all'elemento portante (pietra, laterizio o calcestruzzo), ogni chiusura sia provvista di un rivestimento d'intonaco, sia sul lato interno sia su quello esterno. Fanno eccezione le murature lapidee, che si è scelto di mantenere faccia a vista e dunque prive di rivestimento esterno.

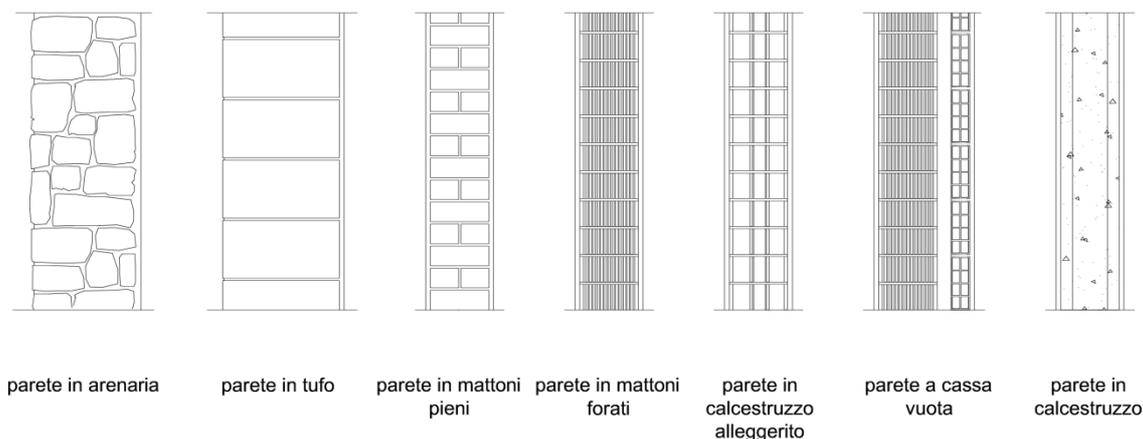


Figura 2.1 – Chiusure verticali selezionate per le simulazioni.

Tutte le soluzioni tecniche vengono analizzate nelle zone climatiche C, D, E ed F, ad eccezione della muratura in blocchi di tufo. Questa, infatti, essendo tipica esclusivamente dell'Italia centro-meridionale [3], viene studiata solo nelle corrispondenti zone climatiche C e D (Figura 1.13).

Per la scelta dei materiali delle murature originarie si è fatto riferimento al database di WUFI[®], che raccoglie le proprietà utili alla simulazione igrotermica di tutti i materiali testati nei laboratori del Fraunhofer IBP o in altri istituti di ricerca e università.

Le suddette proprietà sono poi state confrontate con le norme UNI/TR 11552 [41] e UNI 10351:2015 [43] e in seguito modificate per renderle conformi alla normativa e al contesto italiano. In Appendice (Tabella A.1) si può vedere quali materiali del database WUFI[®] sono stati modificati e quali valori sono stati cambiati.

Per i materiali lapidei mancano, in Italia, informazioni sistematiche sulle proprietà igrotermiche. Tuttavia, per valutare in linea generale il comportamento delle murature realizzate con pietre naturali, si è selezionata l'arenaria (pietra arenaria *Kresheneimer*) direttamente dal database di WUFI[®], senza eseguire ulteriori correzioni. Ciò costituisce una grande semplificazione, poiché tutte le pietre naturali presenti nella banca dati (tufo compreso), oltre a essere fortemente anisotrope, sono pietre tipiche del territorio tedesco, con caratteristiche diverse dall'arenaria italiana. Inoltre, anche se presenta proprietà simili a quelle presenti nella UNI/TR 11552 (come conducibilità, densità e capacità termica), questa arenaria è priva del coefficiente di trasporto liquido.

Fatte queste doverose precisazioni, l'elenco delle proprietà usate per i materiali che costituiscono la struttura portante delle soluzioni tecniche originarie è visibile in Tabella 2.1 (altri dettagli sono visibili in Appendice, Figura A.23-Figura A.25).

Tabella 2.1 – Proprietà dei materiali per le murature originarie – struttura portante.

Materiale	ρ	ϵ	λ	c	μ
	[kg/m ³]	[m ³ /m ³]	[W/mK]	[J/kgK]	[-]
Calcestruzzo	2300	0.18	2.30	850	925
Calcestruzzo alleggerito	1200	0.64	0.54	1100	75
Mattone forato	800	0.60	0.40	850	15
Mattone pieno	1900	0.24	0.60	850	10
Pietra arenaria	2440	0.13	2.25	850	2485
Pietra tufo	1450	0.45	0.34	925	10

Per quanto riguarda i materiali non portanti, la scelta del tipo d'intonaco da assegnare a ciascuna chiusura segue le indicazioni fornite da uno studio del 1984 eseguito dal Ministero dei Beni Culturali, inerente agli intonaci più diffusi in Italia dal Settecento fino all'età contemporanea [44].

Come mostrato in Figura 2.2, fino agli inizi del XX secolo erano in voga prevalentemente malte a base di calce, eventualmente miscelate ad aggiunte idrauliche quali pozzolana o cocciopesto. Nel '900 si diffonde l'uso delle malte a base di calce e cemento (le cosiddette malte bastarde), mentre negli anni '50 è la volta delle prime aggiunte polimeriche. L'utilizzo indiscriminato di tali materiali anche nel campo del restauro, tuttavia, ha portato spesso all'insorgenza di problemi legati all'incompatibilità chimica e fisica dei nuovi materiali con gli originari, fessurazioni, minore traspirabilità della chiusura, maggiore sensibilità all'attacco di solfati e alcali. Solo negli anni '80, con un approccio più consapevole a suddetti problemi, gli intonaci a base di cemento e/o polimeri sono stati sostituiti da materiali con proprietà simili a quelle delle malte storiche, ricorrendo nuovamente anche alla calce e al gesso. Inoltre, si sono sfruttate le nuove conoscenze scientifiche per creare intonaci maggiormente resistenti all'acqua ma tuttavia traspiranti (ad esempio usando aggiunte di silani e silossani per renderli idrorepellenti).

Alla luce di tale studio, anche nel presente lavoro si è cercato di fare uso d'intonaci di diversa natura, per tenere conto della molteplicità delle condizioni reali e verificarne le prestazioni igrotermiche nei differenti contesti climatici italiani.

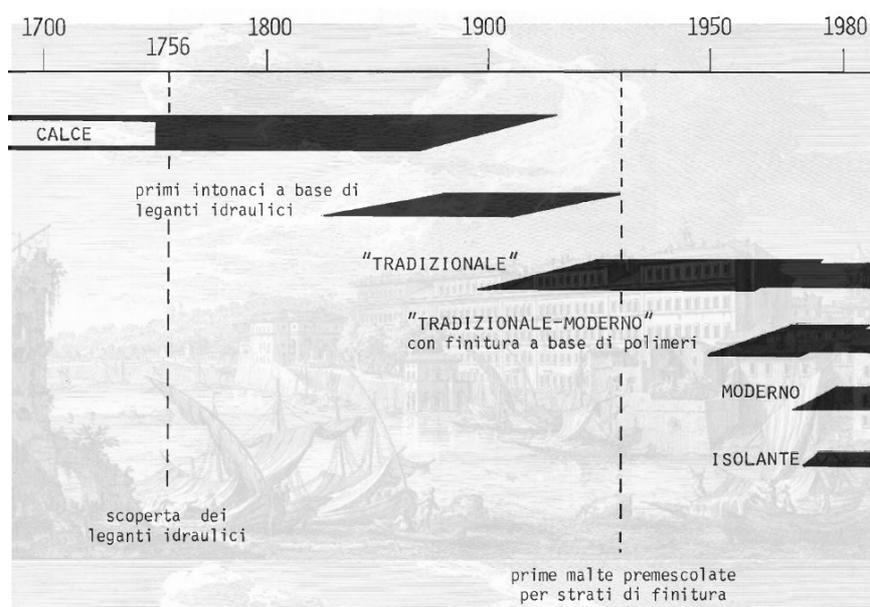


Figura 2.2 – Evoluzione degli intonaci usati in Italia dal Settecento agli anni '80 [44].

Per le soluzioni tecniche originarie, quelle cioè antecedenti all'intervento di risanamento energetico e dunque prive di strato isolante, si è scelto:

- sul lato esterno intonaco calce-cemento ($A = 2 \text{ kg/m}^2\text{h}^{1/2}$);
- sul lato interno intonaco di gesso per murature in laterizio o calcestruzzo, intonaco di calce-pozzolana per murature lapidee.

Per gli interventi con isolamento esterno si è fatto ricorso ai seguenti materiali, in aggiunta agli intonaci esistenti:

- sul lato esterno intonaco calce-cemento ($A = 0,1 \text{ kg/m}^2\text{h}^{1/2}$);
- tra isolante e muratura intonaco minerale, applicato direttamente sulla malta calce-cemento esistente (intonaco esterno originario).

Nei casi in cui si è adottato l'isolamento dall'interno, si sono usati i seguenti materiali:

- sul lato esterno intonaco calce-cemento originario ($A = 2 \text{ kg/m}^2\text{h}^{1/2}$), intonaco calce-cemento idrorepellente ($A = 0.1 \text{ kg/m}^2\text{h}^{1/2}$);

Gli interventi di risanamento energetico con isolamento in intercapedine non prevedono l'applicazione di nuovi strati d'intonaco.

Per gli intonaci applicati sulla superficie esterna si è posta particolare attenzione alle caratteristiche di assorbimento d'acqua e permeabilità al vapore degli stessi, scegliendo in base ad alcune ricerche effettuate dal Politecnico di Milano sui rivestimenti a cappotto [45]. In particolare, per gli intonaci antecedenti agli anni '80 propri delle chiusure originarie qui studiate, si è scelto un coefficiente di assorbimento A pari a $2 \text{ kg/m}^2\text{h}^{1/2}$, cioè sufficientemente alto da non costituire ostacolo all'accesso della pioggia nella compagine muraria. Per i nuovi interventi, invece, si è optato per intonaci con capacità idrorepellente, dunque con coefficiente A basso, pari a $0.1 \text{ kg/m}^2\text{h}^{1/2}$. Si è evitato di usare rivestimenti polimerici per non compromettere la traspirabilità delle chiusure: gli intonaci esterni hanno un fattore di resistenza alla diffusione di vapore μ pari a 20-25.

Nel caso di murature lapidee faccia a vista, presupponendo di non poter applicare un intonaco esterno per fini estetici, si è scelto di simulare l'effetto di un trattamento idrorepellente. Tale trattamento coinvolge i primi 5 mm dello strato esterno e modifica unicamente il coefficiente A , in modo che sia ridotto a $0.1 \text{ kg/m}^2\text{h}^{1/2}$. Sul lato interno, invece, in osservanza alla tradizione costruttiva di tali murature [44] e in modo da garantirne la compatibilità materica, si è preferito adottare una malta idraulica a base di calce e pozzolana, invece di un intonaco di gesso come negli altri casi.

Le proprietà igrotermiche degli intonaci costituenti le stratigrafie originarie sono riepilogate in Tabella 2.2 (per maggiori informazioni si rimanda all'Appendice, Figura A.26 e Figura A.27).

Tabella 2.2 – Proprietà dei materiali per le murature originarie – intonaci.

Materiale	ρ	ϵ	λ	c	μ
	[kg/m ³]	[m ³ /m ³]	[W/mK]	[J/kgK]	[-]
Intonaco di calce e cemento	1900	0.80	0.24	850	19
Intonaco di calce e pozzolana	1566	0.39	0.50	850	7.4
Intonaco di gesso	850	0.65	0.20	850	8.3
Intonaco minerale	1900	0.24	0.80	850	25

2.1.2 Materiali isolanti

Ai fini del presente studio, per ogni chiusura sono applicate le tre principali tecniche d'intervento, così come descritte nel § 1.2, variando al contempo l'isolante, in modo da considerare i materiali coibenti più diffusi nel contesto edile italiano. A tal fine ci si è avvalsi di alcune indagini, reperibili in letteratura [3],[46].

In particolare, l'ANIT (*Associazione Nazionale per l'Isolamento Termico-Acustico*) ha realizzato un'approfondita analisi di mercato [46] per individuare i materiali isolanti più diffusi in Italia dopo la ratifica della 2010/31/UE [2]. Tale analisi ha coinvolto solo gli interventi di riqualificazione edilizia, dal momento che la porzione maggiore di investimenti in tal senso è rivolta proprio agli edifici esistenti (cfr. § 1.1) ed è influenzata da fattori quali: spessore e costi dell'isolante, prestazioni energetiche conformi ai requisiti di legge, eco-sostenibilità e facilità di posa. Ne risulta che il materiale isolante più venduto è il polistirene (62%), seguito da lana minerale (24%) e poliuretano (6%), come mostrato in Figura 2.3. Rimane un indefinito 8%, nel quale si possono annoverare sia gli isolanti da insufflaggio per pareti a cassa vuota, sia nuovi materiali non ancora molto diffusi come il sughero.

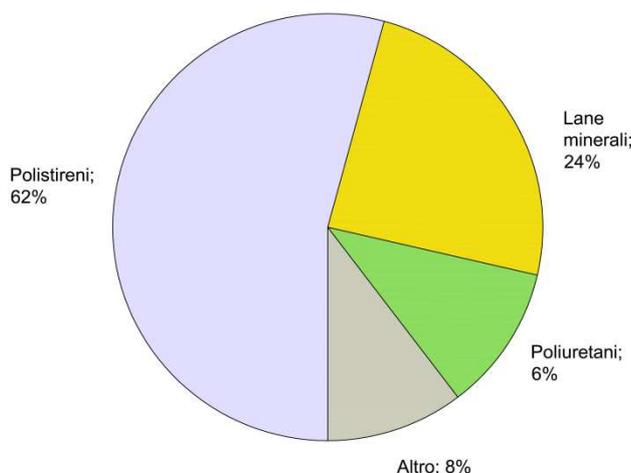


Figura 2.3 – Distribuzione percentuale dei materiali isolanti rispetto al volume venduto nel 2012 [46].

Oltre ai materiali citati in tale ricerca, si sono selezionati altri isolanti, come suggerito da [3]. Al termine di questa selezione risultano undici materiali isolanti, riportati in Tabella 2.3 secondo la classificazione proposta da [47] e [48].

Tabella 2.3 – Classificazione dei materiali isolanti.

Materiali isolanti				
Materiali isolanti fibrosi		Materiali isolanti a struttura cellulare		
Minerali	Vegetali	Minerali	Vegetali	Sintetici (*)
Fibre/lana di roccia	Fibre di legno	Perlite	Sughero	Polietilene
	Tifa	Argilla espansa		Polistirene
		Silicato di calcio		Poliuretano

(*) Quelli sintetici a struttura cellulare sono a celle chiuse, gli altri a celle aperte.

Tale classificazione prevede la suddivisione degli isolanti in fibrosi e a struttura cellulare, ulteriormente distinti in minerali, vegetali e sintetici. Gli isolanti a struttura cellulare possono avere celle aperte o chiuse, mostrando così proprietà molto variegata dal punto di vista igrometrico. Quelli a celle aperte, così come gli isolanti fibrosi, mantengono inalterata la traspirabilità della parete originaria, riducendo così il rischio di formazione di muffa; tuttavia, richiedono spessori elevati e perdono la loro capacità isolante in presenza di alti tassi di umidità. Per contro, gli isolanti a celle chiuse, in genere di origine sintetica, non sono sensibili all'acqua e possono dunque essere usati anche in condizioni in cui il rischio di bagnamento è elevato. Va detto però che la permeabilità al vapore della chiusura diminuisce molto e quindi il potenziale di asciugamento della stessa si abbassa drasticamente, con conseguenti maggiori rischi di condensa e muffa.

Una volta designati gli isolanti da studiare, è opportuno definire quali di questi possano essere usati per ognuno dei tre interventi di risanamento energetico prospettati (isolamento sul lato esterno, interno o in intercapedine, cfr. § 1.2).

La Tabella 2.4 mostra i campi di applicazione scelti per ogni isolante. Va segnalato tuttavia che, nel caso di murature lapidee, si sono esclusi gli isolanti cellulari sintetici. Esse sono infatti estremamente massive e necessitano di elevati potenziali di asciugamento per poter tenere sotto controllo il contenuto di umidità al loro interno. Tali potenziali verrebbero drasticamente ridotti nel caso si allestissero isolanti non permeabili al vapore, con conseguenti problemi di condensa e durabilità.

Tabella 2.4 – Isolanti selezionati e loro campo d'applicazione in relazione ai tre interventi di risanamento energetico proposti.

Materiale isolante	Isolamento esterno	Isolamento in intercapedine	Isolamento interno
Argilla espansa	no	si	no
Fibre di legno	no	si	si
Lana minerale	si	si	si
Perlite	no	si	no
Polietilene (*)	si	si	si
Polistirene (*)	si	si	si
Poliuretano (*)	si	si	si
Silicato di calcio	si	si	si
Sughero	no	si	si
Tifa	si	si	si

(*) Esclusi per l'isolamento delle murature lapidee.

In virtù dei diversi valori di conducibilità termica di ciascun isolante, a parità di muratura e intervento di risanamento le soluzioni tecniche avranno spessori diversi, in modo da rispettare i valori di trasmittanza termica limite per ogni zona climatica, come riportato in Tabella 1.2. È possibile visionare gli spessori assegnati per ogni soluzione tecnica considerata in Appendice (Tabella A.2 e Tabella A.3). Lo spessore dell'isolante è dunque variabile, ma sempre inferiore a 200 mm, per evitare eccessivo spreco di spazio nel caso d'isolamento interno e per conformarsi alle dimensioni standard prodotte. Inoltre, nel caso d'isolamento in intercapedine, le dimensioni dello strato isolante sono vincolate dallo spessore stesso dell'intercapedine (max. 60 mm). Per questi motivi, nel caso in cui una combinazione muratura originaria – isolante non soddisfi le limitazioni imposte dalla legge [8], tale soluzione tecnica viene omessa dallo studio. Come conseguenza, ad esempio, per gli interventi d'insufflaggio del coibente nell'intercapedine della cassa vuota, risulta che solo la perlite in zona C1 rispetta i limiti di trasmittanza imposti dalla legge. Pertanto questo unico caso viene nel seguito analizzato per l'isolamento in intercapedine.

Va inoltre segnalato che, nel caso di muratura isolata con lana minerale, vengono studiati ogni volta due casi distinti, per tenere conto della prassi costruttiva; ovvero:

- con barriera al vapore (mediamente $s_d = 20$ m) fra il lato caldo dell'isolante e l'intonaco di gesso;
- senza barriera al vapore fra il lato caldo dell'isolante e l'intonaco di gesso.

Per le soluzioni tecniche risanate con isolamento in intercapedine, per motivi ergonomici si sono considerati esclusivamente i materiali coibenti che possono essere inseriti per insufflaggio nella cavità. Questo tipo di intervento è infatti il più comune, in quanto meno complesso e costoso rispetto alla messa in opera di pannelli. Ciò riduce il campo degli isolanti utilizzabili alla sola argilla espansa e alla perlite. Tuttavia, inserendo questi materiali all'interno dell'intercapedine d'aria della chiusura a cassa vuota, si è verificato che solo la perlite rientra nei limiti di trasmittanza imposti dal DM 26/06/2015 [8], peraltro solo per la zona climatica C. Per tutte le altre zone, infatti, il sistema d'isolamento in intercapedine non risulta verificato, a meno di non variare le caratteristiche geometriche della chiusura. Queste però, per uniformità con le altre soluzioni tecniche studiate, sono mantenute costanti. Ne consegue che le chiusure con isolamento in intercapedine, prive dei necessari requisiti di trasmittanza termica limite imposti dalla legge, sono escluse dal presente studio.

Le proprietà degli isolanti sono le stesse che è possibile trovare nella banca dati WUFI®. Le principali sono elencate nella Tabella 2.5, mentre per i dettagli si rimanda all'Appendice (Figura A.28-Figura A.32).

Tabella 2.5 – Proprietà degli isolanti selezionati.

Materiale	ρ	ϵ	λ	c	μ
	[kg/m ³]	[m ³ /m ³]	[W/mK]	[J/kgK]	[-]
Argilla espansa	719	0.67	0.119	850	7.0
Fibre di legno	155	0.98	0.042	1400	3.0
Lana minerale	60	0.95	0.040	850	1.3
Perlite	100	0.96	0.042	850	8.0
Polietilene	15	0.95	0.040	1500	30
Polistirene	40	0.95	0.030	1500	100
Poliuretano	40	0.95	0.030	1500	50
Silicato di calcio	180	0.93	0.060	920	2.1
Sughero	150	0.90	0.040	1400	10
Tifa	260	0.75	0.048	1500	30

2.1.3 Un nuovo materiale isolante: la tifa

Come si può notare in Tabella 2.3, tra gli isolanti scelti è incluso anche un materiale fibroso di origine vegetale, detto tifa. Si tratta di un materiale innovativo ed ecosostenibile, messo a punto al Fraunhofer IBP [49],[50].

La materia prima di tale isolante è la tifa, una pianta sempreverde paludosa che si trova principalmente in zone temperate e tropicali Figura 2.4 (a). Ha un'altezza media di 3 m ed è composta da 10-12 foglie concentriche con sezione trasversale a mezzaluna. La particolare struttura delle foglie rende la pianta particolarmente adatta per la produzione di materiali da costruzione. La parte esterna della foglia, composta da un tessuto cellulare e attraversata da un fitto sistema di fibre verticali, è rinforzata da camere interne; ogni cella è riempita da un tessuto spugnoso Figura 2.4 (b).

Grazie alla combinazione della resistenza a trazione dello stelo con il tessuto elastico-spugnoso, la tifa mantiene la sua forma anche se essiccata. Le proprietà meccaniche, tuttavia, differiscono molto in funzione della direzione fibre. Lungo l'asse longitudinale, parallelamente cioè allo sviluppo delle fibre, il materiale raggiunge una resistenza a compressione di circa 1 N/mm²; leggermente superiore quella a trazione. Perpendicolarmente alle fibre, invece, la sezione trasversale si deforma (in campo elastico) già a fronte di modesti carichi, pari a circa 0.01 N/mm² [49].

Dal punto di vista termo-acustico, le caratteristiche della tifa sono molto buone: vari studi condotti su questo materiale [50] hanno evidenziato che la conduttività termica media è pari a circa 0.048 W/mK, con piccole variazioni dipendenti dalla densità e dalla porosità del materiale (minore la densità e il raggio dei pori piccoli, maggiore è la resistenza termica del materiale).

La tifa ha una permeabilità al vapore abbastanza contenuta ($\mu = 30$), cosa che le permette di avere un processo di asciugatura rapido; al contempo è resistente all'acqua, così da non aver bisogno di alcuna protezione. L'uso di barriere al vapore non è necessario. Il materiale, inoltre, provenendo da habitat umidi e aggressivi, è

dotato di una grande resistenza alla decomposizione, nonché alla formazione di muffa e al fuoco. Infine, la tifa è un materiale fortemente eco-sostenibile: essa è infatti riciclabile e ha un basso consumo energetico di produzione.

L'unica questione che ancora ne ostacola la commercializzazione riguarda la coltivazione e produzione su larga scala della pianta. Allo scopo sono stati eseguiti degli studi sull'eventuale impatto ambientale che tale coltura avrebbe sul terreno e sulla flora e fauna locale in Europa. Le ricerche condotte sono molto incoraggianti, poiché hanno evidenziato come la tifa sia una pianta con una crescita molto veloce e una grande adattabilità a qualsiasi tipo di clima e di terreno. Essa ha la capacità di assorbire anidride carbonica e tutti i nutrienti di cui necessita delle acque di scarico; inoltre, è resistente agli insetticidi, ai sali e agli acidi.

In Figura 2.4 (c) è visibile il prodotto finito: l'isolante si presenta sotto forma di pannello costituito da frammenti di tifa di diverso spessore, tagliati parallelamente allo sviluppo delle fibre, disposti parallelamente l'uno all'altro e infine incollati tra loro con percentuali variabili di magnesite (40-60%). La percentuale di magnesite influenza le proprietà termiche (0.048-0.061 W/mK) e meccaniche del materiale [50].

Per un riepilogo delle proprietà della tifa si veda la Tabella 2.5.

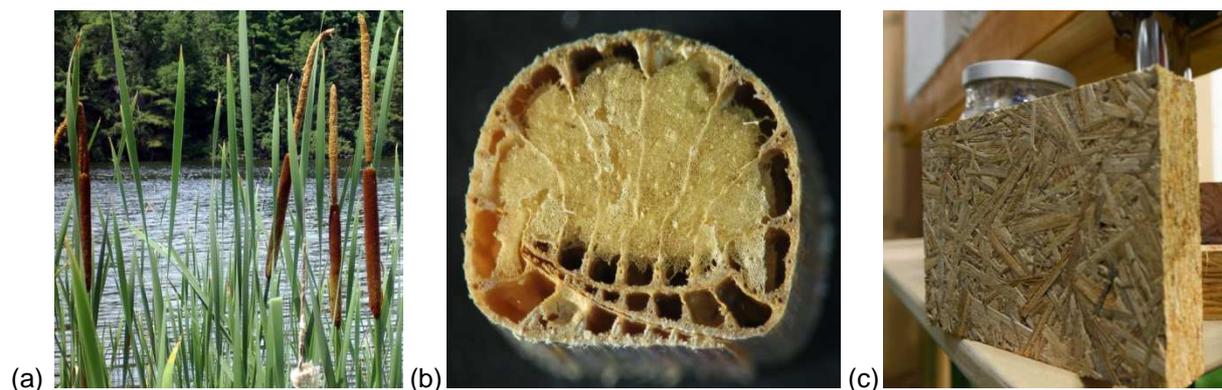


Figura 2.4 – Tifa: (a) pianta (foto da www.biologhiegiardini.it); (b) sezione trasversale della foglia (foto di Chr. Gruber BLfD); (c) pannelli di tifa e magnesite (foto Fraunhofer IBP).

Oltre all'isolante, a partire dalla tifa sono stati realizzati altri materiali edili, composti da particelle di tifa più fini, quali:

- malte per giunti, adottate per avere una perfetta aderenza fra elementi strutturali lignei e i pannelli isolanti;
- malte di livellamento, da applicare sulle murature nel caso presentino una superficie non regolare;
- sigillanti, usati come riempimento per le fessure nel legno in modo tale da avere una diffusione del vapore costante su tutta la parete;
- malte esterne, composte da calce e semi di tifa per rinforzare l'intonaco.

2.1.4 Impostazione di stratigrafia e materiali in WUFI®

Una volta definiti materiali e geometria delle soluzioni tecniche che si intende studiare, è necessario trasferire tali informazioni nel programma, in modo da poterle simulare. WUFI® è caratterizzato da una struttura ad albero, il cui primo elemento riguarda l'impostazione della geometria e dei materiali della chiusura da simulare.

A titolo di esempio, in Figura 2.5 è visibile l'interfaccia grafica di WUFI® 6 per l'impostazione della stratigrafia della parete in mattoni pieni con isolamento interno con tifa. Si comincia introducendo gli strati da sinistra verso destra, ovvero dall'esterno verso l'interno. A ogni strato è possibile attribuire uno spessore (espresso in metri) e un materiale.

Al contempo, viene automaticamente impostata dal programma una griglia numerica, la cui maglia può essere più o meno fitta a seconda di cosa si vuole studiare. La si può infittire, per studiare strati sottili e ottenere risultati più precisi; tuttavia la simulazione sarà più lenta in quanto la soluzione numerica risulta più onerosa da calcolare. Per motivi opposti (simulazione più rapida a fronte di risultati meno precisi), la si può rendere più rada. Nel caso specifico, si è mantenuta la maglia standard della griglia.

È inoltre possibile impostare delle posizioni monitor (telecamere) nei punti di maggiore interesse della soluzione tecnica. Il programma imposta in partenza due posizioni di controllo, alla superficie esterna e interna; tuttavia, se ne possono aggiungere molte altre. In questo studio si sono impostate indicativamente le seguenti posizioni di controllo:

- superficie esterna;
- lato freddo dell'isolante;
- lato caldo dell'isolante;
- superficie interna.

Un'altra opzione riguarda l'inserimento di sorgenti / pozzi di calore / umidità, in modo da simulare specifici fenomeni, quali perdite d'acqua, infiltrazioni di pioggia, infiltrazioni di umidità dovute a moti convettivi, resistenze elettriche, ecc.

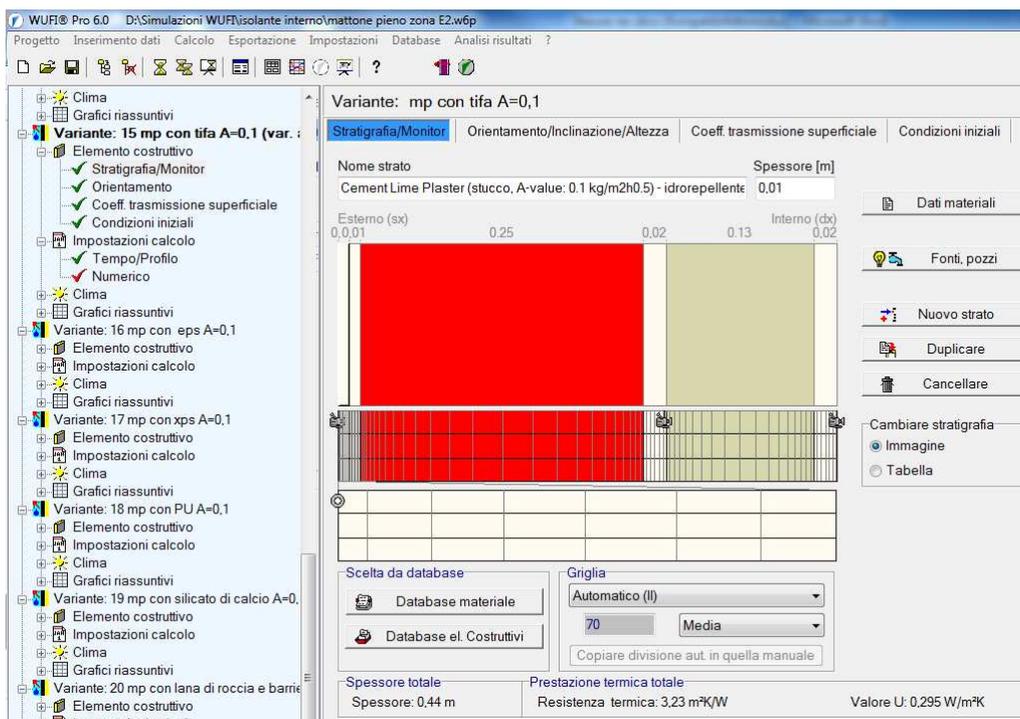


Figura 2.5 – Sezione “Stratigrafia/Monitor” in WUFI® 6 con esempio d’isolamento esterno con tifa.

Selezionando (doppio clic del mouse) uno degli strati a scelta, si apre la schermata che riassume le proprietà del materiale, come illustrato in Figura 2.6. In alto sono mostrate le caratteristiche di base del materiale (densità, porosità, calore specifico, ecc.), mentre in basso sono riportate le funzioni igrotermiche con relativa tabella o grafico. Tali proprietà sono modificabili sbloccando il lucchetto posto in alto a destra.

In questo caso specifico, le proprietà dell’intonaco di calce e cemento sono state effettivamente modificate, in modo da poter simulare una malta idrorepellente. Per poter ottenere tale risultato si selezionano le voci relative ai coefficienti di trasporto liquido e si mette la spunta sulla casella “generare”. A questo punto il programma mostra una casella destinata al coefficiente di assorbimento d’acqua A, il cui valore numerico può quindi essere inserito.

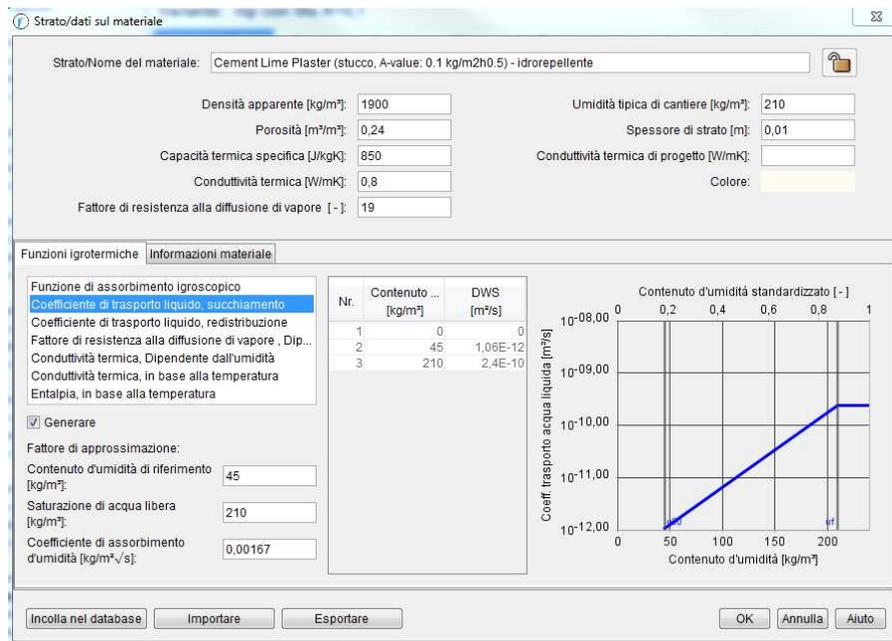


Figura 2.6 – Sezione “Dati materiale” per l’intonaco calce-cemento idrorepellente. Il coefficiente A è stato modificato manualmente.

Si è accennato prima alla possibilità di inserire fonti o pozzi di calore o umidità in particolari punti della soluzione tecnica (cfr. Figura 2.5), in modo da simulare specifici fenomeni, quali perdite d’acqua, infiltrazioni di pioggia, infiltrazioni di umidità dovute a moti convettivi, resistenze elettriche, ecc.

Questa possibilità è stata sfruttata, nel presente studio, per simulare l’infiltrazione di acqua piovana sul lato caldo dell’isolante esterno. Si è inserita cioè una fonte di umidità. La Figura 2.7 mostra la relativa schermata del programma: dopo aver selezionato lo strato in cui si vuole inserire la sorgente di umidità, è possibile definire l’area di distribuzione dell’infiltrazione, il tipo di fonte e le limitazioni sull’assorbimento d’acqua, cioè sulla quantità di acqua massima che lo strato può contenere. In questo caso una sorgente di umidità pari all’1% della pioggia battente è stata collocata entro i primi 5 mm dello strato dietro l’isolante. La scelta di tale frazione di pioggia deriva dalla norma americana ASHRAE 160 del 2009 [51]. Questa, infatti, impone di considerare che almeno l’1% della pioggia battente sulle chiusure con isolamento a cappotto si infiltri dietro lo stato isolante. Ci si potrebbe chiedere il perché di tale indicazione, e la risposta è semplice: si devono simulare strutture reali, in cui non sono esclusi errori di messa in opera e altre piccole imperfezioni. Si deve, quindi, progettare una chiusura, in modo tale che possa sopportare, per lo meno, una certa quantità d’acqua senza però subire danni gravi, come illustrato in Figura 1.9.

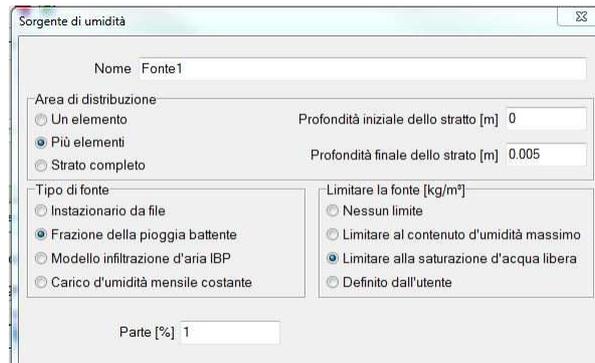


Figura 2.7 – Sezione "Sorgenti di umidità". Percorso: Fonti, Pozzi-Aggiungi sorgente d'umidità.

2.2 Orientamento, inclinazione e altezza della chiusura

Una volta definiti materiali e stratigrafia, è necessario impostare l'orientamento, inclinazione altezza della parete da simulare. La schermata di riferimento è mostrata in Figura 2.8. Questi tre parametri incidono sul calcolo del carico di pioggia battente e dell'irraggiamento solare, incidente sulla superficie in esame.

Per quanto attiene all'orientamento, la scelta si basa sul caso più sfavorevole:

- lato più esposto alla pioggia battente (direzione prevalente del vento);
- lato nord (nel caso si voglia analizzare la formazione di muffa).

La direzione prevalente del vento si determina grazie al grafico a rosa dei venti presente nella sezione "analisi climatica" di WUFI® (Figura 2.23). Nel caso di Milano (Figura 2.22), ad esempio, l'orientamento più sfavorevole è il nord, in quanto più esposto al bagnamento della superficie esterna a causa della pioggia battente (quindi all'abbassamento della temperatura superficiale) e all'infiltrazione d'acqua.

Una volta deciso l'orientamento della chiusura, è necessario impostare l'inclinazione della parete. Questa varia in funzione del tipo di chiusura analizzata (verticale, copertura piana o inclinata). Nel caso in esame si sono considerate solo chiusure verticali (90°).

Infine è richiesto di scegliere l'altezza dell'edificio, la cui chiusura si intende studiare. A questo proposito esistono varie opzioni:

- edificio isolato fino a 10 m di altezza;
- edificio alto, porzione inferiore fino a 10 m di altezza;
- edificio alto, porzione intermedia tra 10 m e 20 m di altezza;
- edificio alto, porzione superiore oltre i 20 m di altezza.

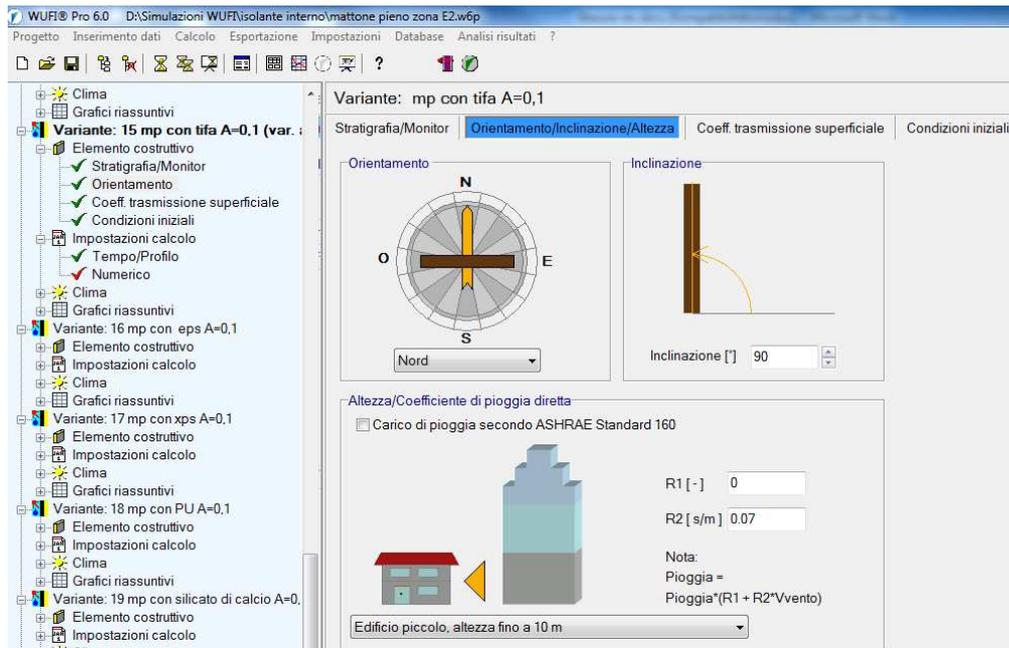


Figura 2.8 – Sezione “Orientamento/Inclinazione/Altezza”.

In base all’opzione scelta, il programma impone i coefficienti di pioggia diretta R_1 ed R_2 : si tratta di due fattori utilizzati per stimare il carico della pioggia battente sul componente edilizio. La quantità di pioggia battente, che bagna effettivamente la parete, viene così calcolata:

$$\text{carico pioggia battente} = \text{pioggia} * (R_1 + R_2 * \text{direzione vento}) \quad (16)$$

I coefficienti di pioggia diretta R_1 e R_2 dipendono dall’inclinazione della facciata e dall’altezza dell’edificio, come si vede in Tabella 2.6. Nel caso in esame si sono considerati edifici isolati, fino a 10 m, abbastanza tipici della realtà edilizia italiana, R_1 vale 0 ed R_2 vale 0.07 s/m. Tale scelta rappresenta un buon compromesso tra lo 0.05 m/s per pareti della stessa altezza, ma appartenenti a edifici più alti, e lo 0.1 m/s di pareti comprese tra i 10 m e i 20 m di altezza.

Tabella 2.6 – Variazione dei coefficienti R_1 e R_2 a seconda dell’inclinazione della chiusura e dell’altezza dell’edificio.

Inclinazione	Altezza edificio	R_1 [-]	R_2 [s/m]
da 0° a 89°	-	1	0
0°	Edificio isolato fino a 10 m	0	0.07
	Edificio, parte inferiore fino a 10 m	0	0.05
	Edificio, parte intermedia fino a 10-20 m	0	0.1
	Edificio, parte superiore oltre i 20 m	0	0.2

2.3 Caratteristiche superficiali

I coefficienti di trasmissione superficiale riguardano le caratteristiche superficiali esterne e interne della chiusura e il modo in cui essa è in grado di mediare tra condizioni al contorno e chiusura stessa. In Figura 2.9 è visibile la relativa schermata di WUFI®.

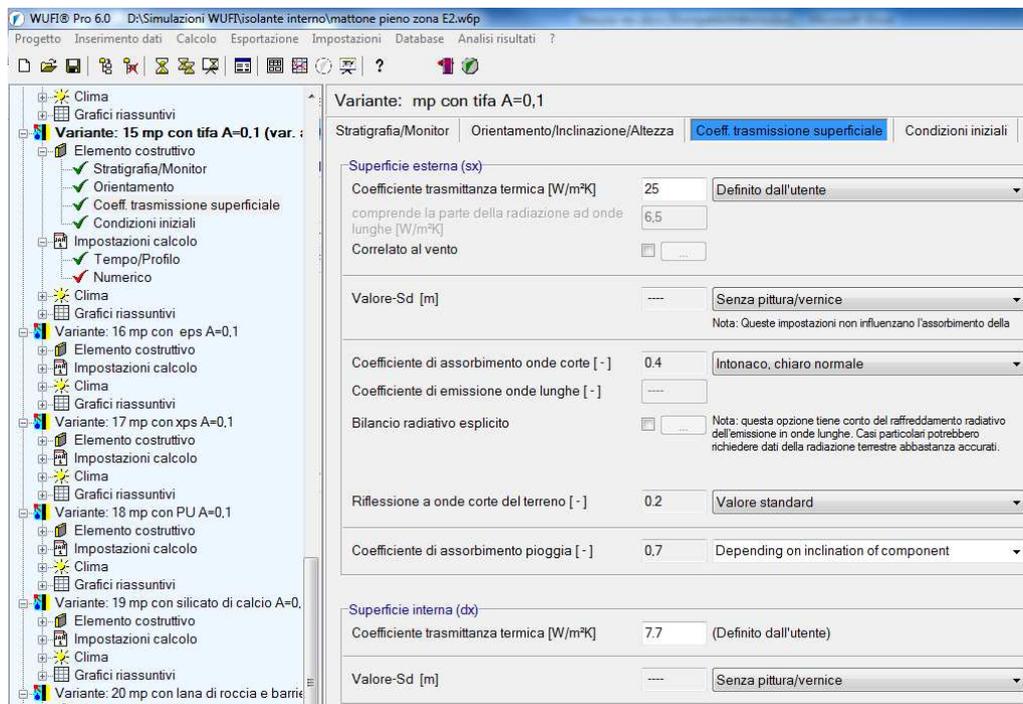


Figura 2.9 – Sezione "Coefficienti di trasmissione superficiale".

In particolare, è richiesto di impostare i seguenti parametri:

- I coefficienti di scambio termico o coefficienti liminari (h_e ed h_i), che determinano lo scambio di calore fra il componente e l'ambiente. Essi dipendono dalle condizioni ambientali locali e sono assunti costanti. I valori tipici per l'Italia, e pertanto adottati in queste simulazioni, sono $25 \text{ W/m}^2\text{K}$ per la superficie esterna e $7.7 \text{ W/m}^2\text{K}$ per la superficie interna, secondo la norma UNI EN ISO 6946 [52]. A proposito di h_e , tuttavia, si fa notare come il valore adottato sia mutuato dal calcolo di Glaser e sia fortemente cautelativo. Esso presuppone infatti che le pareti esterne siano esposte a venti con velocità pari a circa 7.5 m/s , mentre i dati climatici a disposizione evidenziano velocità medie di circa 3.5 m/s (cui corrisponde appunto un h_e pari a $17 \text{ W/m}^2\text{K}$).
- Il valore di permeabilità al vapore s_d della superficie esterna. Questo si imposta solo nel caso di membrane, barriere al vapore e strati sottili superficiali. In tal caso, infatti, sono importanti esclusivamente i valori superficiali (come appunto s_d ed A) e si può evitare di disegnare materiali con spessori molto ridotti, che potrebbero creare errori durante il calcolo del programma. Nelle simulazioni effettuate questo parametro è stato ignorato.

- Il coefficiente di assorbimento a onde corte (α_s) determina la frazione della radiazione solare incidente assorbita dalla parete. I valori cambiano secondo il colore della superficie (Tabella 2.7): nel caso di pareti intonacate si è assunto 0.4 (condizione intermedia fra intonaco chiaro 0.2 e intonaco scuro 0.6).
- Il coefficiente di emissione a onde lunghe (ϵ_s) determina l'emissione di radiazioni termiche della superficie della parete e dipende dalla rugosità della superficie stessa. Il valore di riferimento è 0.9. Tale valore si applica solo nel caso sia attivo il bilancio esplicito radiativo.
- Il bilancio radiativo esplicito è utilizzato nel caso in cui lo scambio di radiazioni fra la superficie e l'ambiente circostante gioca un ruolo importante per la determinazione di un valore accurato della temperatura superficiale del componente, come nel caso delle coperture piane. Questa funzione non è stata usata nelle simulazioni effettuate, dal momento che ci si riferisce esclusivamente a chiusure verticali.
- La riflessione a onde corte del terreno descrive la frazione di onde riflesse da una superficie orizzontale ed è un fattore utile soprattutto per superfici inclinate, poiché ricevono direttamente le radiazioni riflesse dal terreno. I valori cambiano a seconda del materiale di cui è composto il suolo (Tabella 2.8). Nelle simulazioni effettuate si è usato il valore standard di riferimento 0.2.
- Il coefficiente di assorbimento pioggia riduce la quantità di acqua piovana che colpisce effettivamente la superficie. Parte della pioggia, infatti, rimbalza sulla parete e non è coinvolta nell'assorbimento capillare. Si può impostare a scelta il valore del coefficiente tra 0 e 1. A 0 corrisponde assorbimento nullo (come nel caso di elementi esterni riparati o protetti da rivestimento impermeabile); il valore 1 si adotta nel caso di coperture piane. Per situazioni intermedie, selezionando l'opzione "in funzione dell'inclinazione dell'elemento", il programma imposta automaticamente il valore più appropriato in base all'inclinazione della chiusura. Per chiusure verticali si assume 0.7.

Tabella 2.7 – Valori di α_s a seconda del colore della superficie.

Materiali	[-]
Senza assorbimento	-
Intonaco chiaro nuovo	0.2
Intonaco chiaro normale	0.4
Intonaco scuro vecchio	0.6
Pietra arenaria con patina	0.9
Pietra calcarea chiara	0.4

Tabella 2.8 – Valori di riflessione ad onde corte del terreno a seconda del tipo di terreno

Tipologie terreno	Riflessione [-]
Nessuna riflessione	-
Calcestruzzo	0.22
Sabbia	0.40
Superfici di edifici chiari	0.60
Terreno con erba fresca	0.26
Terreno con erba secca	0.25
Valore standard	0.20

2.4 Condizioni iniziali

In questa sezione si definisce il livello iniziale dell'umidità e della temperatura nella muratura. Ad esempio, un componente può essere secco, o avere umidità di costruzione, o ancora essere in equilibrio con l'ambiente posto all'80% UR.

La schermata relativa alle condizioni iniziali è visibile in Figura 2.10. Qui si vede come si possano imporre:

- umidità e temperatura iniziali costanti per tutta la chiusura;
- umidità e temperatura diverse per ogni strato;
- profilo dell'umidità e della temperatura iniziale arbitrario, letto da un file ASCII (.asc), da esportare direttamente da WUFI® nella sezione "Esportazione->Esportazione ASCII".

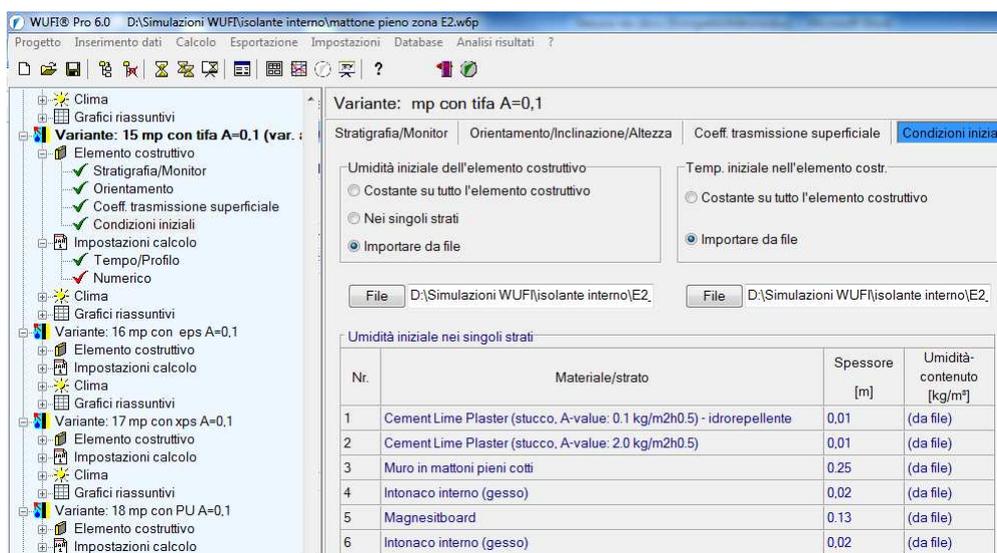


Figura 2.10 – Sezione "Condizioni iniziali".

Per le soluzioni tecniche con isolamento a cappotto si è considerata una temperatura costante per ogni chiusura (20 °C) e, trattandosi di edifici esistenti, un contenuto d'acqua corrispondente all'equilibrio con 80% UR (si è evitato cioè di considerare l'acqua di costruzione per materiali massivi quali calcestruzzi o laterizi).

Tuttavia, nel caso d'interventi di risanamento energetico con isolante interno, per valutare l'effetto dell'applicazione del coibente sulla chiusura esistente e l'eventuale riduzione del potenziale di asciugamento, è bene eseguire una simulazione preliminare. Ciò è stato fatto anche in questo studio. In particolare, si impongono umidità e temperatura costanti e si avvia una simulazione della durata di 10 anni, al termine della quale si suppone di ottenere, verosimilmente, le condizioni igrotermiche attuali dei componenti di un edificio esistente.

I risultati relativi a contenuto d'acqua e temperatura in ogni strato all'istante finale della simulazione preliminare rappresentano i più affidabili dati di input per la simulazione vera e propria della soluzione tecnica comprensiva di isolante. Si esportano dunque i file ASCII (*American Standard Code for Information Interchange*) con i risultati della temperatura e del contenuto d'acqua (Figura 2.11) e si modificano, aggiungendo agli strati esistenti quelli inseriti dopo la ristrutturazione (isolante, malta ed eventualmente barriera al vapore). Nel caso della temperatura, si assegna, ai nuovi strati, lo stesso valore dell'ultimo strato effettivamente simulato (Figura 2.12 (a)). Per l'umidità si deve assegnare, a ciascun materiale, il contenuto d'acqua all'equilibrio con l'80% UR, informazione ricavabile dalla curva di assorbimento igroscopico relativa a ogni materiale (Figura 2.12 b). I due file così modificati possono essere richiamati dal programma come "Condizioni Iniziali-Importa da File".

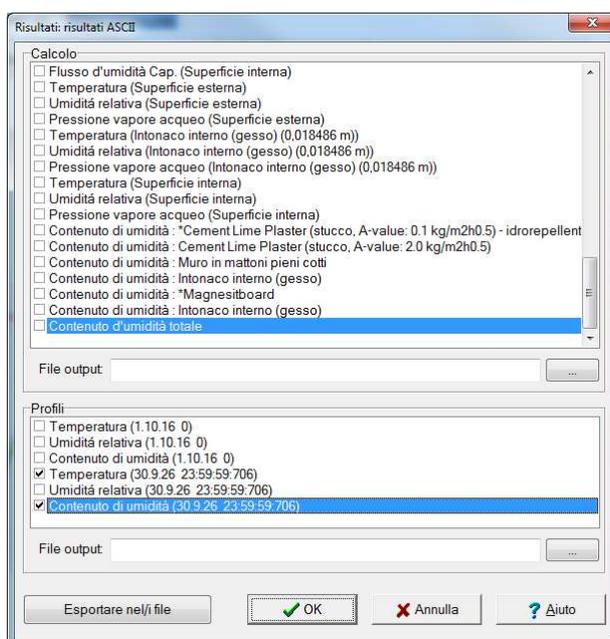


Figura 2.11 – Importazione file ASCII. Percorso: Esportazione-Esportazione ASCII

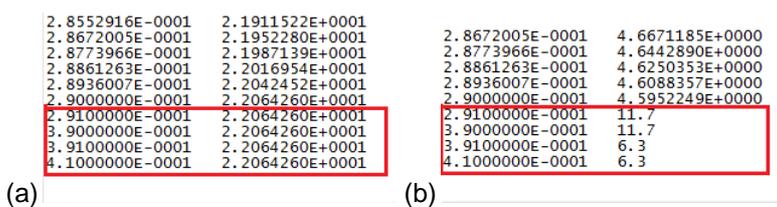


Figura 2.12 – File ASCII per soluzione tecnica isolata dall’interno con lana minerale e barriera al vapore: (a) temperatura; (b) contenuto d’acqua.

2.5 Impostazioni di calcolo

In questa tesi tutte le simulazioni compiute hanno una durata di 10 anni, così da permettere verosimilmente alla chiusura di raggiungere l’equilibrio igrotermico con l’ambiente. Ogni simulazione inizia il 1 ottobre, in modo da non interrompere la stagione fredda (come avviene invece cominciando il calcolo il 1 gennaio, cosa che alcuni preferiscono fare). Si deve scegliere inoltre il passo temporale: qui si è optato per la consueta cadenza oraria dei dati di input e output. La schermata del programma per suddette impostazioni è visibile in Figura 2.13.

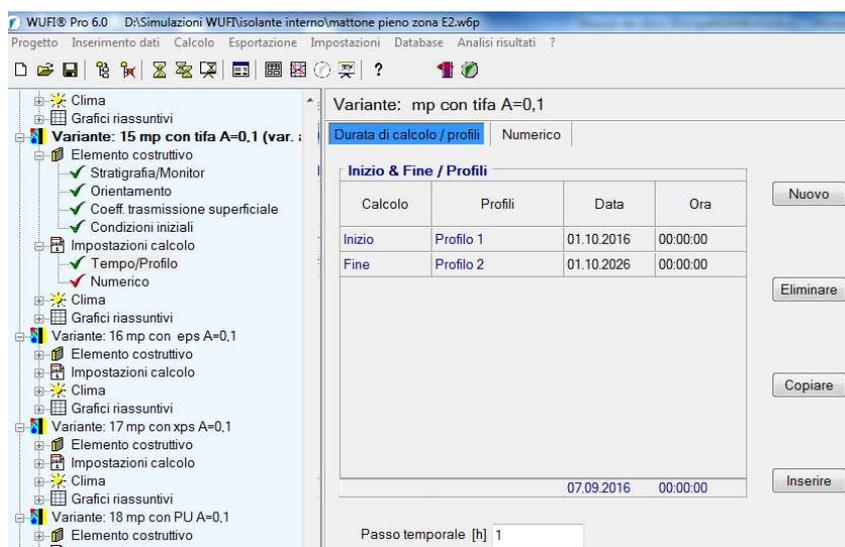


Figura 2.13 – Sezione "Durata di calcoli/Profilo".

Le opzioni mostrate in Figura 2.14, invece, permettono di controllare il modo in cui il calcolo è eseguito: è possibile effettuare la simulazione trascurando l’effetto del trasporto di calore o dell’umidità. Lo stesso discorso vale per specifici fenomeni igrotermici. In tutti i casi, tale procedimento non ha un significato fisico effettivo, ma può servire per investigare l’influenza dei differenti fenomeni sul risultato calcolato. La sezione “parametro numerico” permette di avere una migliore accuratezza nel calcolo dei risultati. In “geometria” si definisce infine il sistema di riferimento: cartesiano o radiale simmetrico. Nelle simulazioni effettuate in questa ricerca si sono lasciate le impostazioni standard del programma, senza modificare nulla.

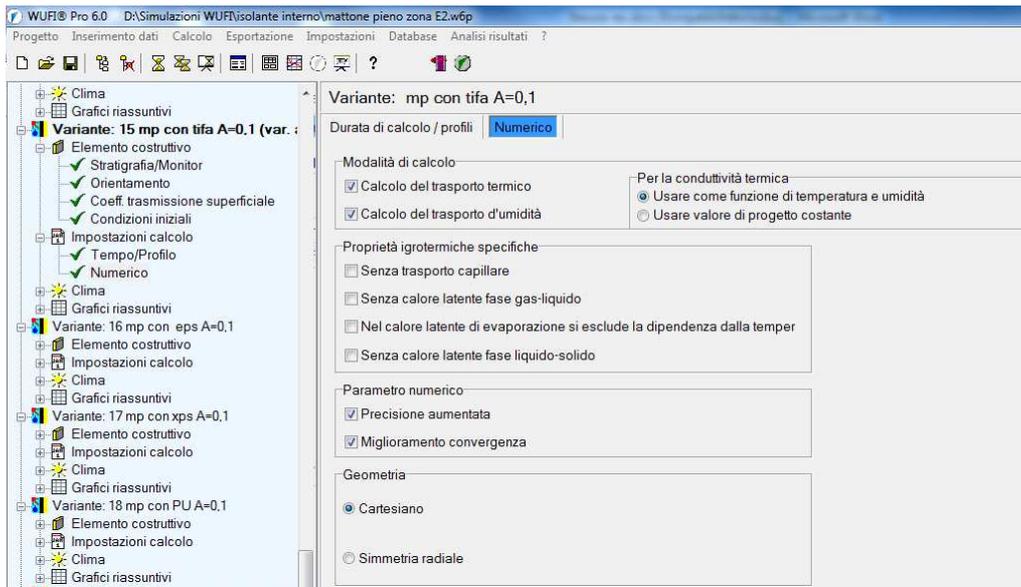


Figura 2.14 – Sezione "Numerico".

2.6 Clima

Le soluzioni tecniche sono esposte a variegata condizioni climatiche esterne, che hanno grande influenza sul comportamento igrotermico della chiusura. Le simulazioni dinamiche, pertanto, hanno bisogno di dati specifici sia per l'ambiente esterno, sia per quello interno (cfr. § 2.6.1 e § 2.6.2). Prima di passare a descrivere tali dati, si ricorda che la superficie sinistra corrisponde sempre al lato esterno del componente, mentre la superficie destra al lato interno (impostazioni standard del programma).

2.6.1 Clima interno

Per l'ambiente interno occorre conoscere la temperatura dell'aria e l'umidità relativa, in genere su base oraria. In assenza di tali valori, esistono tre norme (UNI EN 15026 [16], UNI EN ISO 13788 [10] e ASHRAE 160 [53]), che permettono di determinare le condizioni al contorno interne attraverso approcci semplificati.

In base alla UNI EN 15026 [16], similmente alle linee guida WTA 6-2 [54], la temperatura dell'aria interna è derivata dalla temperatura dell'aria esterna attraverso una funzione lineare. La funzione di conversione si basa sul presupposto che la temperatura interna sia linearmente dipendente da quella esterna. Tuttavia, quando la temperatura esterna è inferiore a 10 °C, la temperatura interna si mantiene costante e pari a 20 °C mediante riscaldamento; per temperature esterne più elevate di 25°C, la temperatura interna si mantiene costante e pari a 25 °C mediante condizionamento.

La variazione dell'umidità dell'aria interna deriva linearmente non solo dalla temperatura, ma anche dal grado di occupazione dell'edificio. Questo significa che le funzioni di conversione devono rispettare dei massimi e dei minimi differenti, secondo la destinazione d'uso dell'edificio. Nella Tabella 2.9, si confrontano la WTA 6-2 e la UNI EN 15026: nonostante si basino sugli stessi principi, il carico di umidità varia a seconda degli ambienti considerati.

Tabella 2.9 – Limiti di UR rispetto al carico di umidità, secondo la WTA 6-2 [54] e la EN 15026 [16].

Carico umidità	WTA 6-2	EN 15026	UR
Basso	Uffici, scuole, negozi	-	25%-55%
Medio	Abitazioni (comprese cucine e bagni)	Uffici e residenze con normale grado di occupazione	30%-60%
Medio + 5%	Incremento del 5% qualora richiesto	-	35%-65%
Alto	Edifici con un alto grado di occupazione	Uffici e residenze con alto grado di occupazione	40%-70%

Nel caso di climi marittimi si dovrebbe fare ricorso alla UNI EN ISO 13788 [10], che propone un modello derivante anch'esso dalla temperatura dell'aria esterna, utilizzando le stesse funzioni di trasferimento della UNI EN 15026 e della WTA 6-2.

La differenza sta nell'aggiunta, all'aria interna, di un carico maggiore di umidità, rendendo così più gravose le condizioni al contorno e ottenendo un comportamento peggiore della chiusura. Inoltre, la norma, non fornisce una definizione precisa di clima "marittimo", riferendosi genericamente a regioni costiere. L'imprecisione sulla determinazione delle effettive zone considerabili "marittime" lascia spazio a diverse interpretazioni, che portano anche a considerare tutta l'Italia come regione costiera. Tale assunzione è tuttavia contestabile, almeno per quanto concerne la zona Alpina e la pianura Padana. Per questa ragione, e per l'eccessivo aumento del carico d'umidità, in questo studio si utilizza sempre la UNI EN 15026 per la determinazione del clima interno, come illustrato in Figura 2.15.

Nel caso di esigenze particolari si può fare ricorso alla ASHRAE 160 [53] o al modello "Sinusoide". L'ASHRAE 160 contiene un modello complesso, che considera numerosi fattori quali: proprietà del sistema di condizionamento, tasso di produzione di umidità a seconda del numero di stanze e dell'utenza, e ricambio d'aria.

Infine è presente un modello indicato per analizzare processi igrometrici di lunga durata (ad esempio la redistribuzione di umidità per diffusione del vapore). In questa sezione è possibile utilizzare le variazioni annuali, ignorando le fluttuazioni delle condizioni al contorno orarie, nel caso in cui queste abbiano scarsa rilevanza sul fenomeno da studiare.

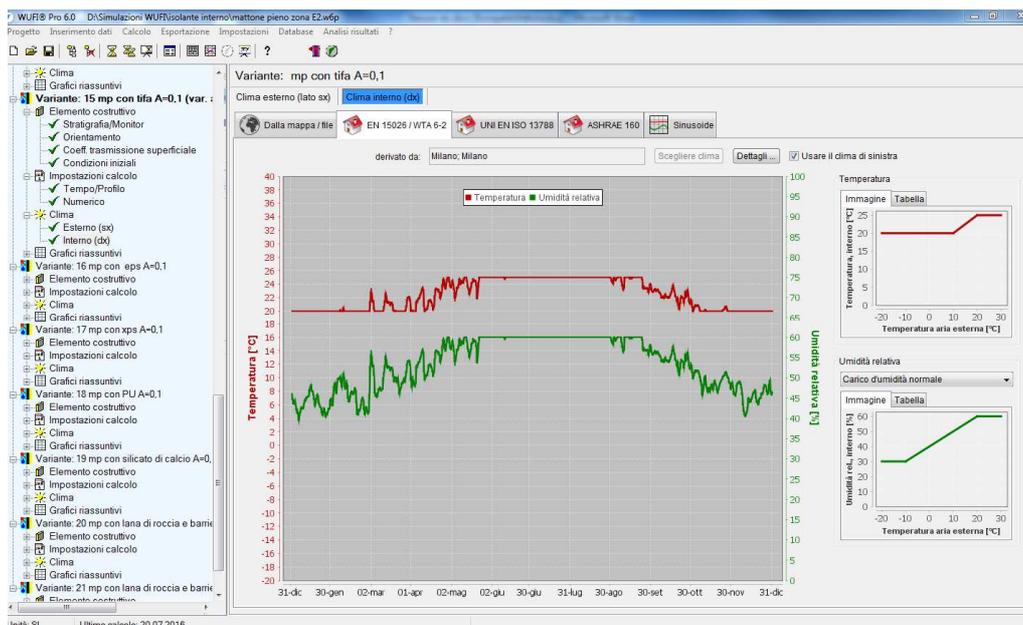


Figura 2.15 – Sezione "Clima interno – EN 15026".

2.6.2 Clima esterno

Dal punto di vista climatico, l'Italia è notoriamente caratterizzata da un clima temperato mediterraneo, ma esistono tuttavia differenze locali, dovute principalmente alla presenza del mare, alla particolare conformazione della penisola e alla sua vasta estensione longitudinale. Per questa ragione è importante analizzare ogni soluzione tecnica in differenti contesti italiani e in differenti zone climatiche.

A tal fine, la sola carta dei Gradi Giorno (Figura 1.13) non è sufficiente, in quanto non abbastanza rappresentativa della peculiarità del clima italiano; allo stesso tempo non fornisce le informazioni necessarie per definire delle località d'interesse per questo studio, poiché non tiene in conto della quantità di pioggia che può influenzare negativamente le prestazioni energetiche di una chiusura.

Per determinare le città da prendere in esame sono state dunque create due mappe dell'Italia, relative alle precipitazioni medie annue dei capoluoghi di provincia⁵. La prima fa riferimento al decennio 2000-2009 (Figura 2.16) ed è tratta dal report dell'*Istituto Nazionale di Statistica* (Istat) [55]; la seconda al trentennio 1971-2000 (Figura 2.17) ed è tratta dall'*Atlante Climatico* dell'Aeronautica Militare (AM) [56].

⁵ La scelta delle sole province parte dal presupposto che [54] e [56], da cui sono stati tratti i dati sulle precipitazioni, fanno riferimento ad un numero limitato di città. Di conseguenza anche la mappa dei Gradii Giorno fa riferimento ai solo capoluoghi.

Capitolo 2

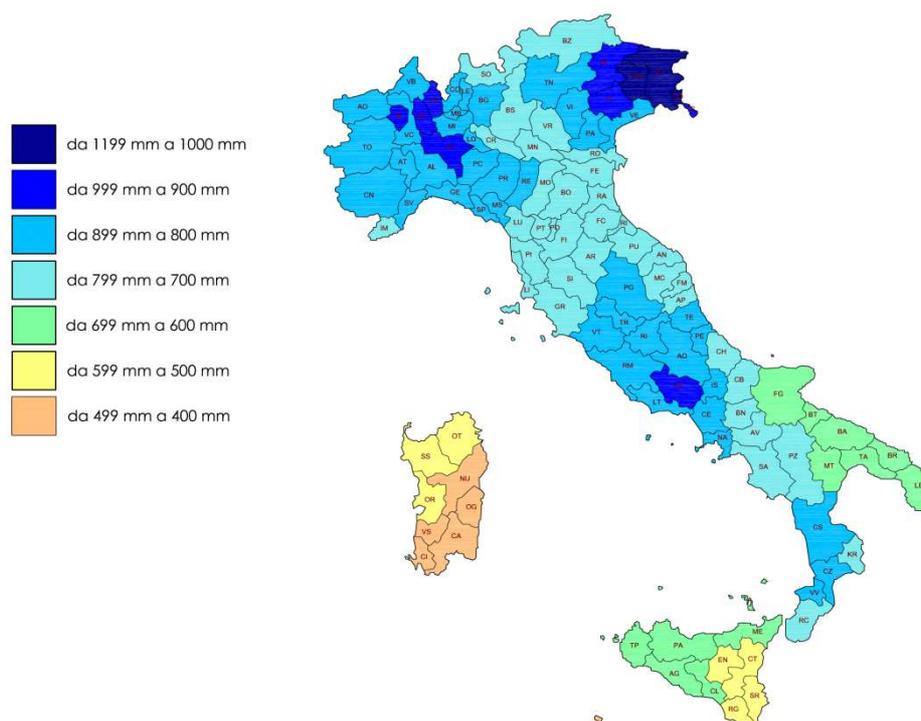


Figura 2.16 – Distribuzione delle precipitazioni per capoluogo di provincia, decennio 2000-2009 [55].

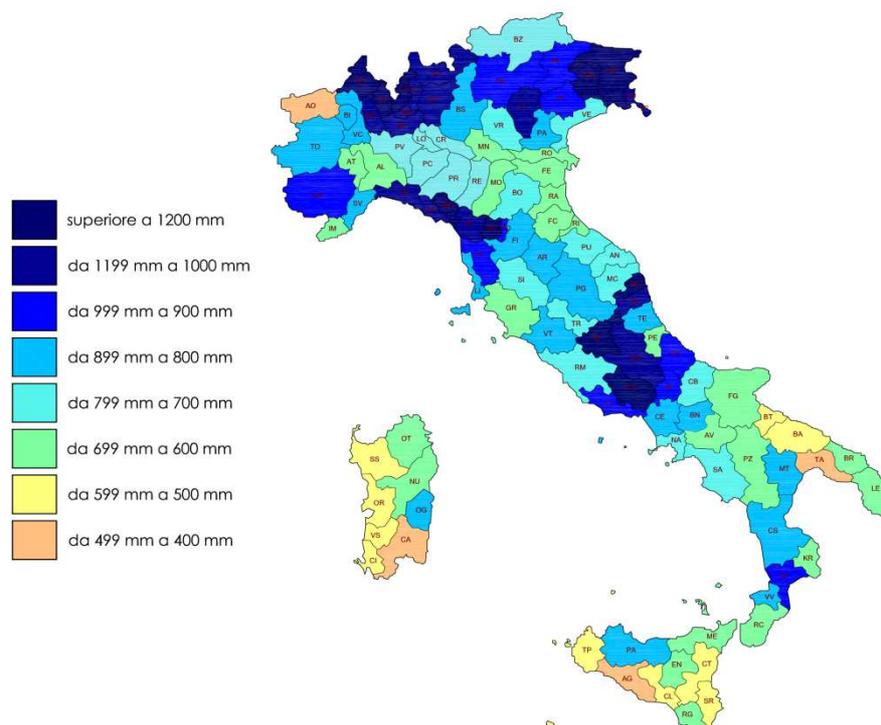


Figura 2.17 – Distribuzione delle precipitazioni medie nel trentennio 1971-2000 [56].

Tali mappe sono state poi confrontate tra loro, così da poter verificare quale delle due sia più rappresentativa nella scelta delle città da analizzare. A questo proposito la Figura 2.18 mostra un confronto tra le due rilevazioni statistiche delle precipitazioni medie nel decennio 2000-2009 [55] e nel trentennio 1971-2000 [56]. Le zone in giallo indicano aree in cui la quantità delle precipitazioni non è variata negli ultimi dieci anni; in rosso si osservano le zone con precipitazioni minori rispetto al trentennio 1971-2000, mentre in verde quelle con tasso di precipitazione in aumento. Si nota, in genere, una riduzione della quantità di pioggia, soprattutto nel centro-nord, mentre al sud si ha un aumento delle precipitazioni. Nel complesso però la situazione non varia profondamente (le differenze risultano in un massimo di 100 mm/anno) e pertanto si è deciso che la scelta della fonte da utilizzare per il proseguimento dello studio debba ricadere sulle analisi più recenti, probabilmente più precise e maggiormente rappresentative della situazione climatica attuale: si è pertanto preferito usare i dati dell'Istat, visibili in Figura 2.16.

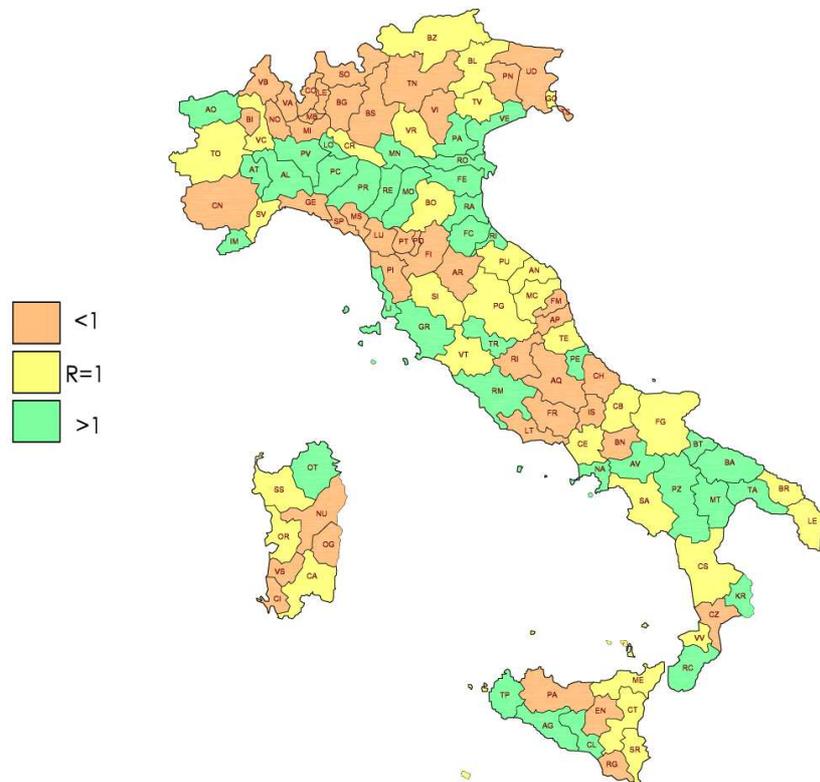


Figura 2.18 – Rapporto tra la distribuzione delle precipitazioni medie nel decennio 2000-2009 [55] e la distribuzione delle precipitazioni medie nel trentennio 1971-2000 [56]. $R=1$ indica quantità costante di pioggia, $R<1$ diminuzione, $R>1$ aumento della stessa.

Determinata così la carta di riferimento per le precipitazioni, sono stati definiti gli intervalli di suddivisione della quantità di pioggia, in accordo con la DIN 4108-3:2014 [14], in modo da poter restringere il campo di ricerca dei microclimi italiani. In Figura 2.19 si può vedere come la [14] definisca solo tre intervalli, riducendo conseguentemente i sette gruppi della Figura 2.16 a sole tre categorie.

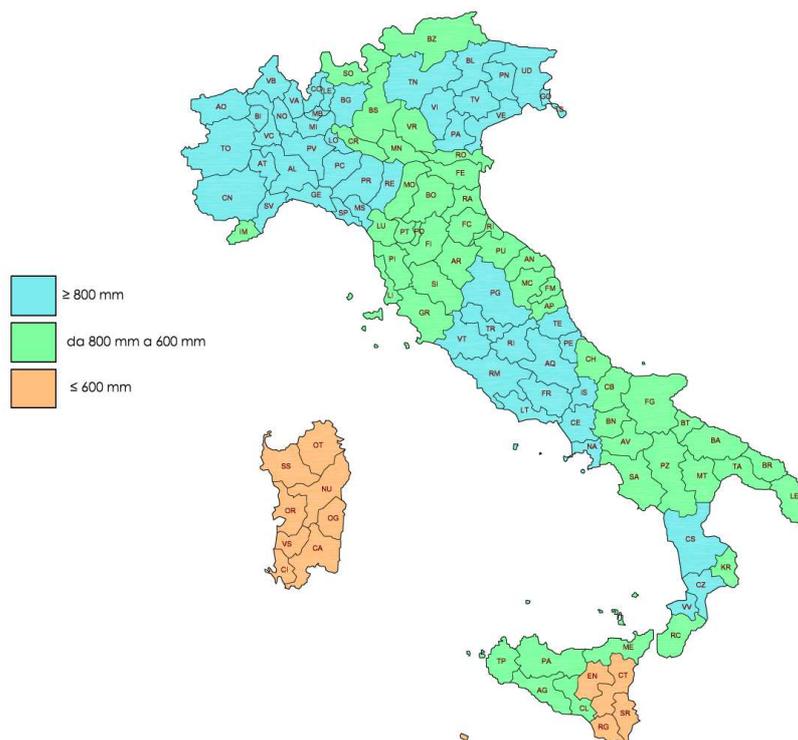


Figura 2.19 – Distribuzione delle precipitazioni per capoluogo di provincia, in base ai dati climatici medi annui dal 2000 al 2009 [55] suddivisi secondo la classificazione della DIN 4108-3:2014 [14].

Con questi presupposti è stata eseguita un'analisi incrociata fra la distribuzione dei Gradi Giorno di Figura 1.13 e la carta pluviometrica di Figura 2.19, ottenendo la carta delle sottozone climatiche usata per questo studio, visibile in Figura 2.20.

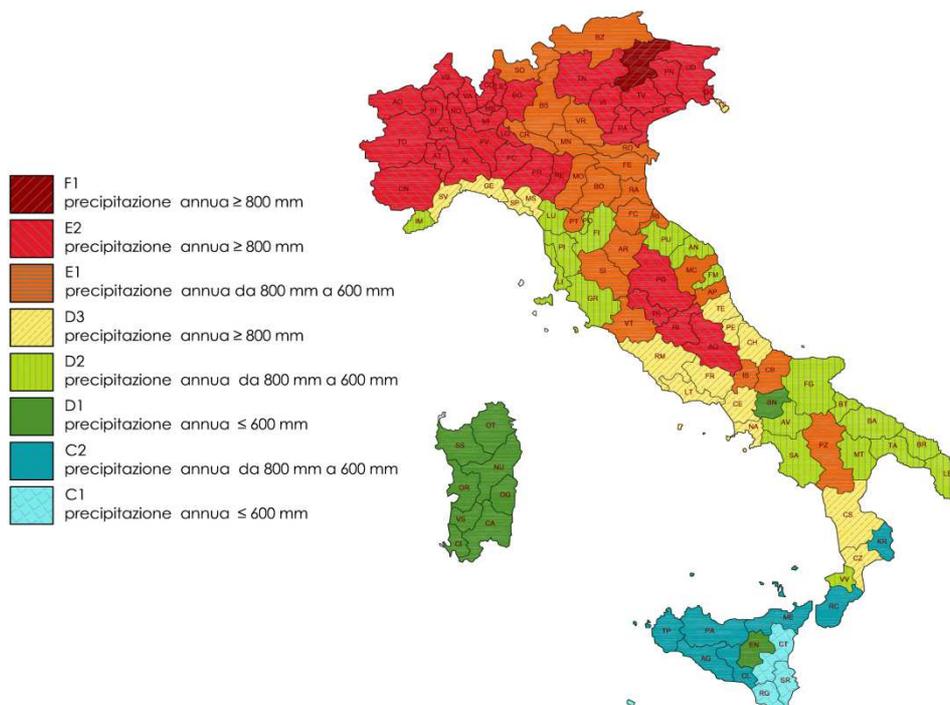


Figura 2.20 – Sottozone climatiche per capoluogo di provincia, secondo la precipitazione media annua dal 2000 al 2009.

Si sono così ottenute otto sottozone, che meglio rappresentano la diversità climatica del territorio italiano. Per ogni categoria è stata selezionata una città rappresentativa, principalmente secondo la disponibilità dei dati climatici orari pervenuti. Va sottolineato, infatti, che l'Italia al momento non ha una banca dati con i valori orari di tutti i dati climatici necessari per le simulazioni dinamiche, quali:

- temperatura dell'aria [°C];
- umidità relativa [%];
- radiazione solare [W/m²];
- direzione del vento [-];
- velocità del vento [m/s];
- precipitazioni [mm];
- pressione atmosferica [hPa].

Come già spiegato nel § 1.4.2.3, al momento l'unica norma con parte dei dati necessari è la UNI 10349 [17], che non contiene però i valori orari della direzione del vento e delle precipitazioni. Per questa ragione sono stati usati i dati del *Ministero delle Politiche Agricole, Genери alimentari e Forestali* (MIPAAF) e i dati già presenti nella banca dati di WUFI[®], che però sono pochi e per lo più concentrati nell'Italia settentrionale (cfr. Figura A.33 in Appendice). In particolare, sono state selezionate tre città tra le otto già presenti in WUFI[®] (Milano, Bolzano ed Enemonzo⁶) e le altre cinque sono state selezionate tra quelle disponibili tra i dati MIPAAF.

In Figura 2.21 sono visibili le otto sottozone selezionate e le città scelte per rappresentarle nelle simulazioni:

- Catania per la zona C1;
- Agrigento per la zona C2;
- Oristano per la zona D1;
- Bari per la zona D2;
- Cosenza per la zona D3;
- Bolzano per la zona E1;
- Milano per la zona E2
- Belluno per la zona F.

⁶ In rappresentanza della zona F, la scelta di Enemonzo, una città in provincia di Udine, invece di Belluno, è dovuta principalmente alla mancanza di dati di quest'ultima (cfr. Figura A.34 in Appendice). Confrontando i dati di Enemonzo con quelli di Belluno, si vede come le due località presentino caratteristiche climatiche simili (zona climatica F e pioggia media annua superiore a 1100 mm), poiché sono entrambe città montane e non molto distanti fra loro.

Di seguito (Tabella 2.10) sono riportate le informazioni principali riguardanti i dati climatici medi delle otto località scelte.

Tabella 2.10 – Medie annuali dei dati climatici (temperatura, UR, pioggia e radiazione solare) per le otto località scelte per le simulazioni.

Clima	Zona	Fonte	T [°C]			UR [%]			Pioggia [mm/anno]	Radiazione [kWh/m ² anno]
			media	max	min	media	max	min		
Catania	C1	-	17.33	36.40	-0.20	70.91	100.00	17.00	440.20	-
Agrigento	C2	-	16.28	38.70	-4.30	76.55	100.00	11.00	611.00	-
Oristano	D1	-	16.54	38.20	0.30	72.30	100.00	15.00	472.60	-
Bari	D2	-	15.59	40.80	-4.00	70.60	94.00	14.00	581.80	-
Cosenza	D3	-	17.15	38.70	-2.10	69.81	100.00	18.00	696.6	-
Bolzano	E1	DB IBP	12.52	34.60	-8.10	63.24	0.98	0.14	704.60	2738.94
Milano	E2	DB IBP	14.88	32.80	-2.40	68.16	0.97	0.10	747.20	2867.05
Belluno ⁽¹⁾	F1	DB IBP	9.82	30.70	-10.80	79.31	0.99	0.10	1284.30	2746.46

(1) Enemonzo.

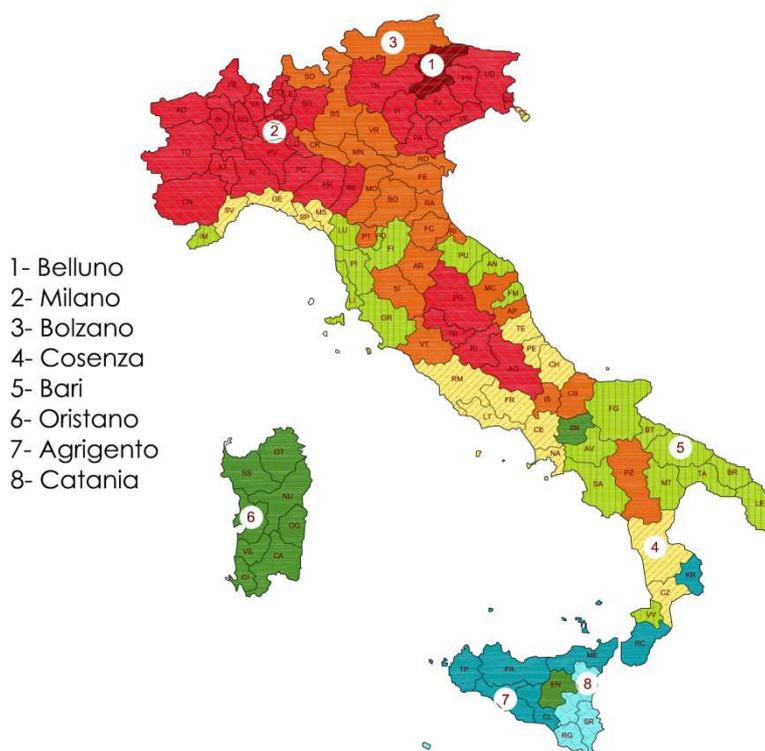


Figura 2.21 – Posizione delle otto località selezionate (le città sono segnate in bianco).

I dati climatici già presenti in WUFI[®] fanno riferimento a un anno tipo, di cui è possibile vedere in Figura 2.22 l'andamento di temperatura, umidità relativa, radiazione solare, pioggia, ecc., oltre alle informazioni relative alla posizione geografica della località (latitudine, longitudine, altitudine, ecc.).

Il programma fornisce, inoltre, un'analisi climatica del luogo selezionato, come mostrato in Figura 2.23, che restituisce:

- le medie e i valori massimi e minimi di ogni proprietà;
- la rosa dei venti;
- il grafico della radiazione solare.

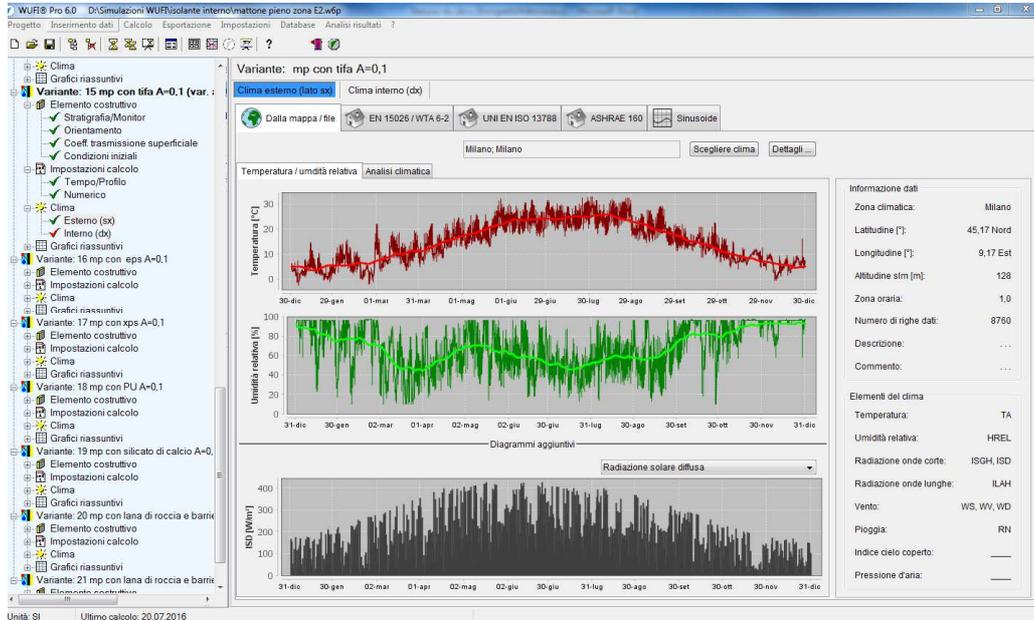


Figura 2.22 – Sezione "Clima esterno" per Milano.

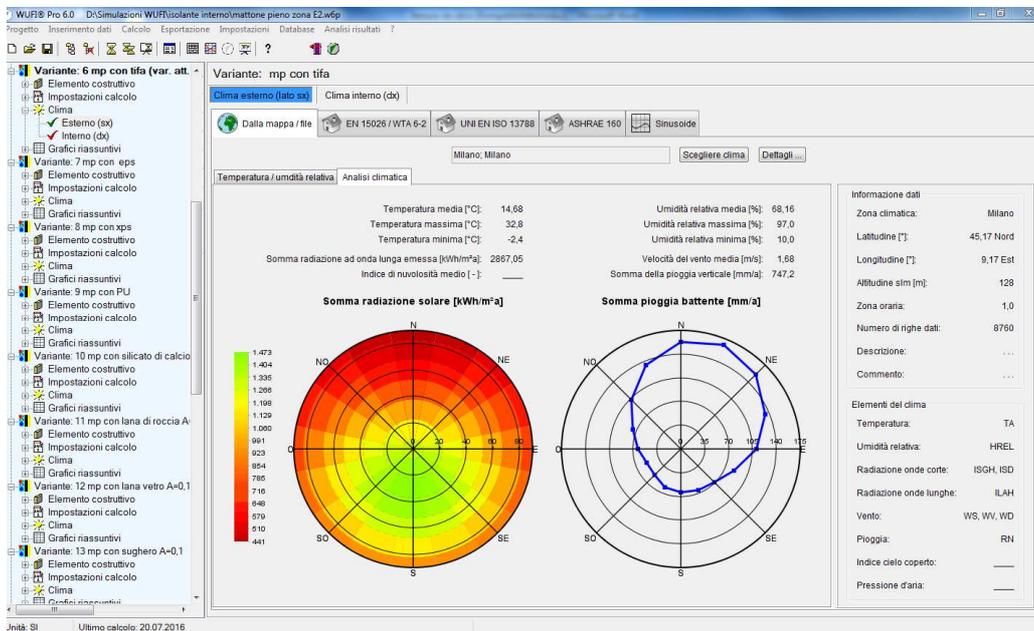


Figura 2.23 – Sezione "Analisi climatica" per Milano.

Per le altre località non comprese nella banca dati del programma, il database del MIPAAF rende disponibili solo i dati orari degli ultimi tre anni (2014-2016), ma contiene tutte le caratteristiche climatiche necessarie per il corretto funzionamento del programma di simulazione. Per le sottozone interessate (C1, C2, D1, D2, D3), tale database contiene ventiquattro stazioni meteo, distribuite nel centro-sud Italia.

Dopo un'attenta analisi sulla distanza e sul numero di dati disponibili (cfr. Tabella A.4 in Appendice), sono state selezionate le stazioni con:

- numero di dati orari sufficienti;
- caratteristiche climatiche simili a quelle dei capoluoghi di riferimento;
- maggiore vicinanza al capoluogo di provincia.

Infine, sono state scelte le seguenti stazioni meteorologiche:

- Santo Pietro per Catania
- Pietranera per Agrigento
- Santa Lucia per Oristano
- Palo del Colle per Bari
- Sibari per Cosenza

Le distanze fra le stazioni e i capoluoghi sono per la maggior parte inferiori a 30 km (cfr. Figura A.34-Figura A.37 in Appendice). Fanno eccezione Sibari e San Pietro che, nonostante siano molto distanti dai rispettivi capoluoghi e si trovino a quote diverse (Figura 2.24), sono state comunque selezionate per mancanza di altri dati disponibili per le zone C1 e D3, ovvero in mancanza di altre stazioni meteo più vicine (cfr. Tabella A.4 in Appendice).

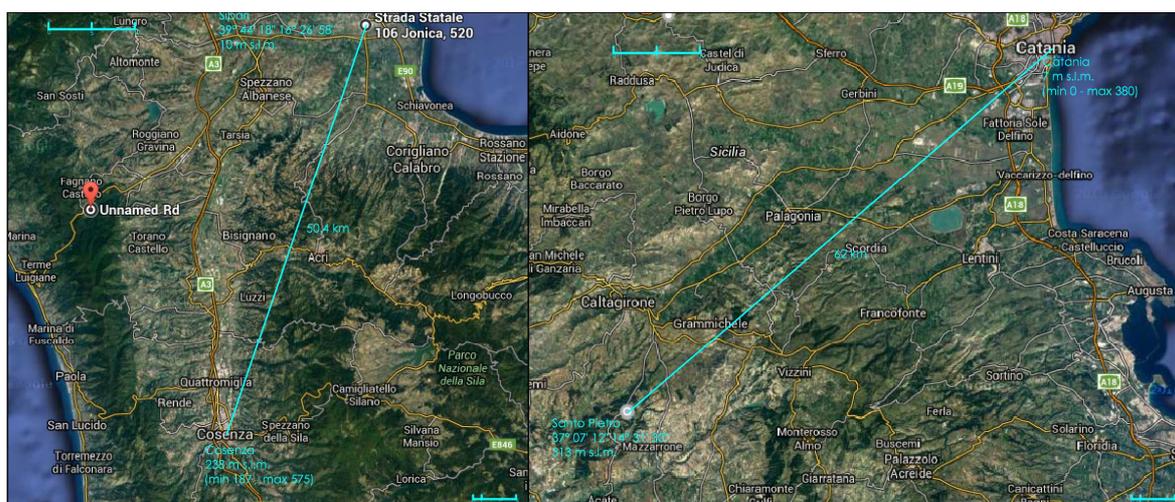


Figura 2.24 – Distanza fra le località selezionate e le stazioni meteo: a) Cosenza-Sibari; b) Catania-Santo Pietro (Google Maps).

Per accertarsi che le condizioni climatiche delle stazioni meteo fossero simili a quelle delle località selezionate e in linea con le medie dell'ultimo decennio, i dati del MIPAAF sono stati confrontati con le medie annuali dell'ultimo trentennio, estratte dall'*Atlante dell'Aeronautica Militare* [56] e dall'Archivio Climatico dell'*Ente per le Nuove Tecnologie, l'Energia e l'Ambiente* (ENEA).

In Tabella 2.11 si può osservare, a titolo di esempio, il confronto tra Catania e Santo Pietro in termini di carico di pioggia (analisi simili sono state fatte per ogni parametro e località e sono consultabili in Appendice, Tabella A.5-Tabella A.24). Come si può notare le differenze fra le medie annuali di AMI ed ENEA rispetto a quella dei tre anni noti sono ridotte. Solo nel caso di Sibari-Cosenza i dati di pioggia misurati negli ultimi tre anni si discostano molto dalle medie calcolate; tuttavia, in mancanza di altre stazioni più rappresentative, si sono comunque utilizzati i dati climatici di Sibari.

Tabella 2.11 – Confronto delle medie mensili e annuali della piovosità [mm] fra MIPAAF, ENEA e AMI. Fontanarossa e Sigonella si trovano entrambe nel raggio di 20 km da Catania.

Fonte	MIPAAF				ENEA		AMI	-
Località	Santo Pietro				Catania	Fontana-rossa	Sigonella	Media
Periodo	2014	2015	2016	Media	2000-09	2000-09	1971-2000	-
Gennaio	85.2	137.2	23.6	111.2	60	75	64.2	66.4
Febbraio	55.6	148.6	25.0	102.1	42	50	43.7	45.2
Marzo	72.6	63.2	68.6	67.9	40	60	31.6	43.9
Aprile	36.0	2.40	0.2	19.2	26	35	24.7	28.6
Maggio	27.4	40.4	14.2	33.9	15	25	21.7	20.6
Giugno	2.60	28.4	5.0	15.5	8	6	8.7	7.6
Luglio	0.80	4.60	-	2.70	2	5	5.7	4.2
Agosto	0.60	22.0	-	11.3	8	9	13.1	10.0
Settembre	28.4	120.2	-	74.3	34	44	31.4	36.5
Ottobre	48.2	68.2	-	58.2	121	117	62.7	100.2
Novembre	28.2	53.6	-	40.9	43	79	66	62.7
Dicembre	54.8	10.6	-	32.7	67	89	73	76.3
Annuo	440.4	699.4	-	569.9	466	594	446.5	520.2

Dopo aver confermato la scelta delle stazioni meteo, si sono esaminati i dati di tutte le categorie per individuare eventuali dati mancanti, così da poter valutare l'entità delle lacune e, ove possibile, integrarle mediante interpolazione. Nel caso delle radiazioni solari è stata eseguita anche un'ulteriore analisi, volta a verificare l'assenza di eventuali contraddizioni (inversione giorno-notte) e di sfasamenti orari.

Una volta controllati e corretti i dati, per le annate 2014 e 2015 sono stati creati i file climatici WAC (WUFI® *ASCII Climate*). Un esempio di tale tipo di file è mostrato in Figura 2.25: a ogni riga corrisponde un'ora (quindi si hanno 8760 righe di dati per un

anno) mentre ad ogni colonna corrisponde un parametro climatico (temperatura, umidità, radiazione solare, pioggia, direzione e velocità del vento).

A questo punto, pur disponendo di due file climatici per ogni località estratta dal MIPAAF (corrispondenti all'anno 2014 e 2015), è necessario operare una selezione di quello più rappresentativo del clima della zona scelta, arrivando eventualmente a definire un anno di riferimento o *Test Reference Year (TRY)* da usare per le simulazioni con WUFI®. Pertanto si sono confrontati dati climatici del 2014 e del 2015, selezionando l'annata con le condizioni meteorologiche che più si avvicinano alle medie annuali di AMI ed ENEA e con piovosità conforme alla corrispondente zona climatica di riferimento, così come illustrato in Figura 2.20.

In Tabella 2.12 è visibile tale confronto e le annate scelte come TRY per ogni zona climatica. In particolare, per la zona C1, C2 e D2 la scelta è ricaduta sul 2014, mentre per le zone D1 e D3 sul 2015. Nella medesima tabella si vede anche come le zone siano in genere conformi alla suddivisione nelle otto zone climatiche di Figura 2.20. Le discrepanze che si possono notare talvolta sono perlopiù trascurabili e dovute principalmente alle anomalie meteorologiche degli ultimi anni rispetto alla tendenza decennale e trentennale e/o a una diversa collocazione delle stazioni meteo rispetto al capoluogo di riferimento. È questo il caso di Cosenza, con pioggia sottostimata poiché la stazione meteo è posta in zona costiera, mentre il capoluogo si trova sui monti, e di Agrigento, con pioggia sovrastimata per il motivo opposto. Talvolta le stesse medie decennali/trentennali si discostano dalla piovosità attesa per la zona designata, secondo le rilevazioni ISTAT [55] usate qui come riferimento. Ciò si osserva per Bari e Agrigento, dove negli ultimi anni si è registrato un aumento della pioggia rispetto al periodo di rilevazione 1971-2000 [56].

Tabella 2.12 – Confronto della piovosità media annua misurata per gli anni 2014 e 2015 con le medie decennali di ENEA e AMI, secondo la classificazione proposta da [14]. I dati annuali scelti come TRY sono evidenziati in azzurro.

Clima	Zona	Intervalli pioggia da [14], [mm]	Medie annuali				
			MIPAAF		AMI	ENEA	Media
			2014	2015			
Catania	C1	$x < 600$	440.00	699.40	594.00	446.50	520.25
Agrigento	C2	$600 < x < 800$	610.00	887.80	360.00	367.70	363.85
Oristano	D1	$x < 600$	665.60	486.20	528.90	604.95	566.93
Bari	D2	$600 < x < 800$	593.80	563.20	521.00	561.90	541.45
Cosenza	D3	$x > 800$	501.80	696.60	959.00	815.10	887.05

```

D2_Bari_Palo_del_colle_2014.WAC - Editor
Datei Bearbeiten Format Ansicht ?
WUFI®_WAC_02
10 Line Offset to 'Number of Data Columns'
Bari - Palo del colle
16.63 Longitude [°]; East is positive
41.05 Latitude [°]; North is positive
191 HeightAMSL [m]
1.0 Time Zone [h from UTC]; East is positive
1 Time Step [h]
26280 Number of DataLines
9 Number of DataColumns
TIME TA HREL ISGH ISD PSTA RN WD WS
2014-01-01 01:00 8.3 0.92 0 0 992.1 0.0 282 1.2
2014-01-01 02:00 8.4 0.92 0 0 992.1 0.0 288 1.5
2014-01-01 03:00 8.5 0.92 0 0 992.1 0.2 281 1.4
2014-01-01 04:00 8.5 0.92 0 0 992.1 0.0 277 1.7
    
```

Figura 2.25 – Esempio di file climatico WAC.

2.7 Riepilogo delle simulazioni effettuate

Al termine di questo capitolo si riepilogano le principali impostazioni delle simulazioni effettuate (Tabella 2.13). Si presenta inoltre la sinossi di tutte le simulazioni igrotermiche eseguite (Tabella 2.14), combinando le sette soluzioni tecniche originarie scelte con gli undici tipi d'isolante e le tre tipologie d'intervento di risanamento energetico proposto (cfr. Figura A.1-Figura A.22 in Appendice). Ogni soluzione tecnica è stata analizzata in tutte le otto zone climatiche italiane.

Tabella 2.13 – Sintesi delle principali impostazioni delle simulazioni effettuate.

Superficie esterna		
Clima esterno	variabile	
Coeff. liminare esterno	25	[W/m ² K]
Coeff. di assorbimento in onde corte		[-]
Intonaco chiaro, normale	0.40	
Pietra calcarea, normale (tufo)	0.40	
Pietra arenaria con patina	0.90	
Coeff. di assorbimento pioggia	0.70	[-]
Inclinazione	90	[°]
Superficie interna		
Clima interno	EN 15026	
Coeff. liminare interno	7.7	[W/m ² K]
Altro		
Fonti di umidità (frazione pioggia)		[%]
Soluzione tecnica originaria	assente	
Con isolamento in intercapedine	assente	
Con isolamento interno	assente	
Con isolamento a cappotto	1%	
Durata della simulazione	10	[anni]
Data di inizio della simulazione	1.10	[-]

Tabella 2.14 – Sinossi completa delle simulazioni igrotermiche effettuate.

Sistema d'isolamento	Parete	Idro-repellente	Materiale isolante										
			Lana minerale		Sughero	Fibra legno	Tifa	CaSi	EPS	XPS	PE	Perlite	
			senza BV	con BV									
Esterno	Arenaria		x					x	x				
	Calcestruzzo		x					x	x	x	x	x	
	Calcestruzzo alleggerito		x					x	x	x	x	x	
	Cassa vuota		x					x	x	x	x	x	
	Mattone pieno		x					x	x	x	x	x	
	Mattone forato		x					x	x	x	x	x	
	Tufo		x					x	x				
Intercapedine	Cassa vuota												x
Interno	Arenaria		x	x	x	x	x	x					
		x	x	x	x	x	x	x					
	Calcestruzzo		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
	Calcestruzzo alleggerito		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
	Cassa vuota		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
	Mattone pieno		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
	Mattone forato		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
	Tufo		x	x	x	x	x	x	x				
		x	x	x	x	x	x	x	x				

3 Valutazione dei risultati delle simulazioni

Questo terzo e ultimo capitolo presenta e commenta i risultati delle simulazioni igrotermiche dinamiche realizzate per la tesi. Si chiarisce in primo luogo la procedura di valutazione dei risultati, che prevede un'analisi numerica prima che igrotermica dei dati di output delle simulazioni. Riguardo alle verifiche igrotermiche vere e proprie, si chiariscono i punti che è importante prendere in esame e quali debbano essere i criteri di controllo/valori limite da rispettare secondo la normativa vigente o la prassi prevalente. Infine si presentano nel dettaglio, a titolo d'esempio (muratura in mattoni pieni in zona C1) gli esiti delle simulazioni e si confrontano con quelli delle altre soluzioni tecniche nelle varie zone climatiche, chiarendo quali di esse siano accettabili e perché.

3.1 Procedura per la valutazione dei risultati in WUFI®

Se i dati di input sono completi e formalmente corretti, la simulazione ha inizio e WUFI® risolve simultaneamente, istante per istante e in maniera iterativa, le equazioni accoppiate del trasporto e accumulo di calore e umidità (§ 1.5.2.3), come schematizzato in Figura 3.1.

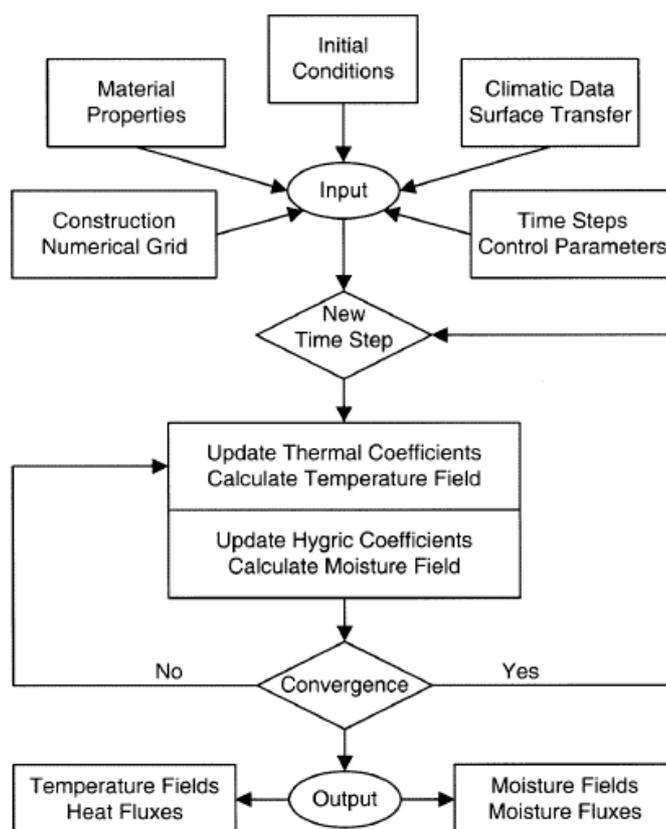


Figura 3.1 – Diagramma di flusso di riferimento per il procedimento di calcolo di WUFI® [29].

Al termine della simulazione, ciò che si ottiene sono gli andamenti, nel tempo, dei profili di temperatura, umidità relativa e contenuto d'acqua all'interno della soluzione tecnica, oppure gli andamenti temporali degli stessi parametri nei singoli strati che la compongono. Tali risultati necessitano in primo luogo di una verifica della loro attendibilità numerica e plausibilità fisica. Solo successivamente è possibile procedere all'analisi igrotermica qualitativa e quantitativa dei risultati, secondo i criteri di valutazione di seguito descritti. È importante ricordare, tuttavia, che tali criteri di accettazione non sono universalmente validi e che i risultati delle simulazioni vanno esaminati singolarmente e valutati in funzione del tipo di materiale.

3.1.1 Valutazione numerica

La prima azione da intraprendere, una volta disponibili i risultati della simulazione, è la verifica dell'attendibilità numerica dei dati di output e della loro plausibilità fisica. A questo scopo, al termine di ogni simulazione il programma apre automaticamente una finestra, in cui sono riassunti i dati relativi alla qualità del calcolo numerico. Essi comprendono il numero degli errori di convergenza e la quantificazione dei bilanci. I primi rappresentano la differenza tra la soluzione numerica e la soluzione esatta. I secondi sono due, di cui il primo indica la variazione complessiva del contenuto d'acqua totale, il secondo il flusso di umidità attraverso le superfici della soluzione tecnica simulata. Differenze notevoli tra queste due grandezze sono indice di risultati non affidabili legati a problemi numerici.

I problemi numerici sono legati principalmente a errori di convergenza emersi durante il processo iterativo della simulazione. Se tutto procede senza problemi si raggiunge il criterio di convergenza entro il numero massimo di iterazioni previste dal programma, come illustrato in Figura 3.2 (a). In caso contrario, raggiunto il numero massimo d'iterazioni ammesse per un singolo istante temporale, non si ottengono soluzioni intermedie che soddisfino i criteri di convergenza. In questi casi l'iterazione si interrompe e il risultato ottenuto viene accettato, segnalando al contempo al programma la presenza di un errore. Il numero totale di errori, quindi, fornisce una prima indicazione circa l'affidabilità numerica dei risultati. Tuttavia è possibile che i criteri di convergenza siano stati mancati di poco e che la soluzione raggiunta sia prossima alla convergenza e dunque ugualmente accettabile, come mostrato in Figura 3.2 (b). In questo caso, la differenza tra i bilanci di massa è minima. In caso contrario si avranno notevoli differenze nei bilanci di massa, indice di risultati non affidabili e dunque da escludere, come presentato in Figura 3.2 (c).

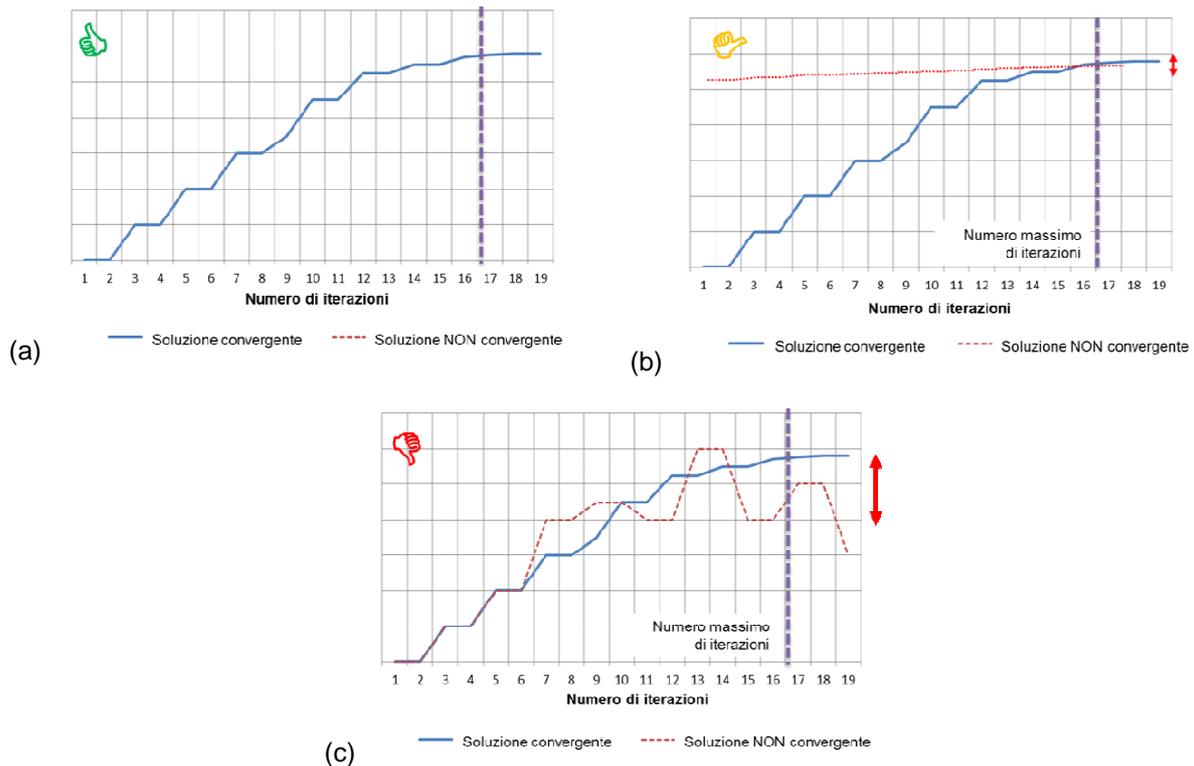


Figura 3.2 – Problemi di convergenza: (a) criterio di convergenza raggiunto; (b) criterio di convergenza non raggiunto ma soluzione convergente con piccole differenze tra i bilanci; (c) criterio di non convergenza non raggiunto e soluzione divergente con grande differenza tra i bilanci.

Il numero di errori non è quindi molto indicativo dell'accuratezza dei risultati; è necessario allora controllare i bilanci (*Bilancio 1* e *Bilancio 2* in Figura 3.3), che rappresentano rispettivamente la variazione del contenuto totale d'acqua durante il periodo di calcolo (negativo: asciugamento, positivo: accumulo di umidità) e la somma dei flussi d'umidità attraverso le superfici (quantità d'acqua che entra ed esce dal componente). Idealmente questi numeri devono essere identici, poiché qualsiasi modifica del contenuto d'acqua deve derivare dall'umidità trasportata dall'esterno attraverso le pareti. In realtà si hanno spesso piccole differenze nei bilanci, che però sono generalmente trascurabili. Questa situazione si riscontra spesso quando, durante la simulazione, un materiale raggiunge la saturazione, ovvero si trova a 100 % UR: in tal caso il calcolo diventa più oneroso e sono possibili rallentamenti nelle iterazioni temporali e piccoli errori non significativi, che non inficiano la soluzione finale della simulazione.

The screenshot shows a window titled "Stato dell'ultimo calcolo eseguito" with the following content:

Stato del calcolo

Data/Ora del calcolo	09.09.2016 11:36:17		
Tempo esecuzione calcolo	49 min.11 sec		
Inizio / Fine del calcolo	01.10.2016 / 01.10.2026		
Quantità errori convergenza	0		

Controllo qualità numerica

Integrale dei flussi, lato sx (kl,dl)	[kg/m ²]	10,16	-15,85
Integrale dei flussi, lato dx (kr,dr)	[kg/m ²]	4E-7	4,0
Bilancio 1	[kg/m ²]	-4,17	
Bilancio 2	[kg/m ²]	-4,18	

Contenuto d'umidità [kg/m³]

	Inizio	Fine	Min.	Max.
Contenuto d'umidità totale	8,46	4,28	4,02	8,46

Contenuto d'umidità [kg/m³]

Strato/materiale	Inizio	Fine	Min.	Max.

Calcolo bloccato

Figura 3.3 – Sezione “Stato dell'ultimo calcolo eseguito”.

Se invece le differenze relative e assolute tra i bilanci sono elevate, i risultati non sono affidabili. Non è possibile però definire a priori una differenza di bilancio massima accettabile, poiché è necessario valutare ogni specifica situazione. Ad esempio, per simulazioni pluriennali, la differenza di bilancio potrebbe crescere in proporzione alla durata di calcolo, senza però rappresentare un errore significativo. Nella prassi, comunque, affinché i risultati siano considerati accettabili, si ammette un numero massimo di casi con problemi di bilancio pari al 5 % di tutte le soluzioni.

Nello studio in questione si è riscontrato che nel caso d'isolamento dall'interno alcune soluzioni presentano una differenza di bilancio di circa 0.70 in valore assoluto. Si sono analizzate le cause di queste differenze di bilancio e si è notato come, in genere, le chiusure che riscontrano maggiori problemi sono quelle senza trattamento idrofobizzante (ciò vuol dire che la parete non protetta, assorbe troppa acqua) e sono concentrate principalmente nella zona climatica E2. Si è quindi approfondito il problema e si è riscontrato che i grafici del contenuto d'acqua in data 30 agosto presentano delle brusche variazioni (Figura 3.4), dovute a dei picchi di umidità e alla grande quantità di pioggia presente in quel giorno (17 l/m²) (Figura 3.5). Lo stesso discorso si può ripetere per le altre zone climatiche, anche se presentano un numero di incongruenze di bilancio ridotto e legato solo a un paio di soluzioni per ogni categoria. In conclusione, tenendo in conto che i problemi di bilancio sono legati ai dati climatici, che il periodo di analisi è di dieci anni e il numero di soluzioni con incongruenze di bilancio è inferiore al 5 %, tutti i risultati sono ritenuti ammissibili.

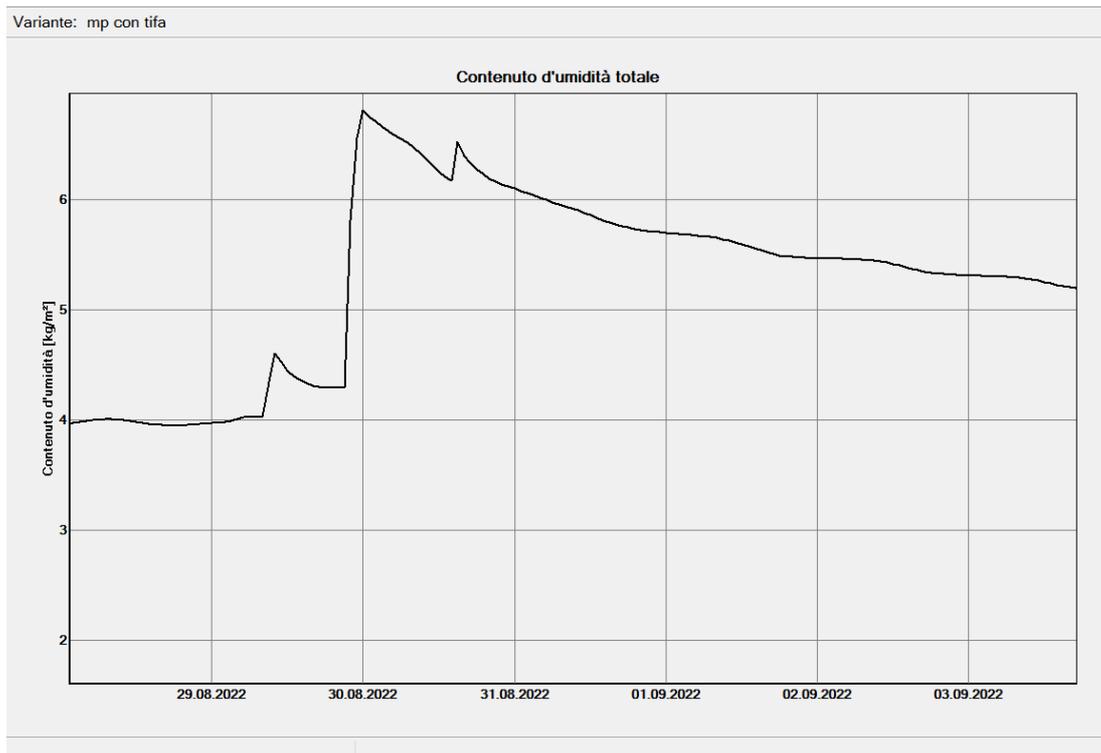


Figura 3.4 –Grafico del contenuto d’acqua per la tifa nella zona E2 (Milano). Si può notare la presenza del picco della quantità d’umidità in corrispondenza del 30 agosto.

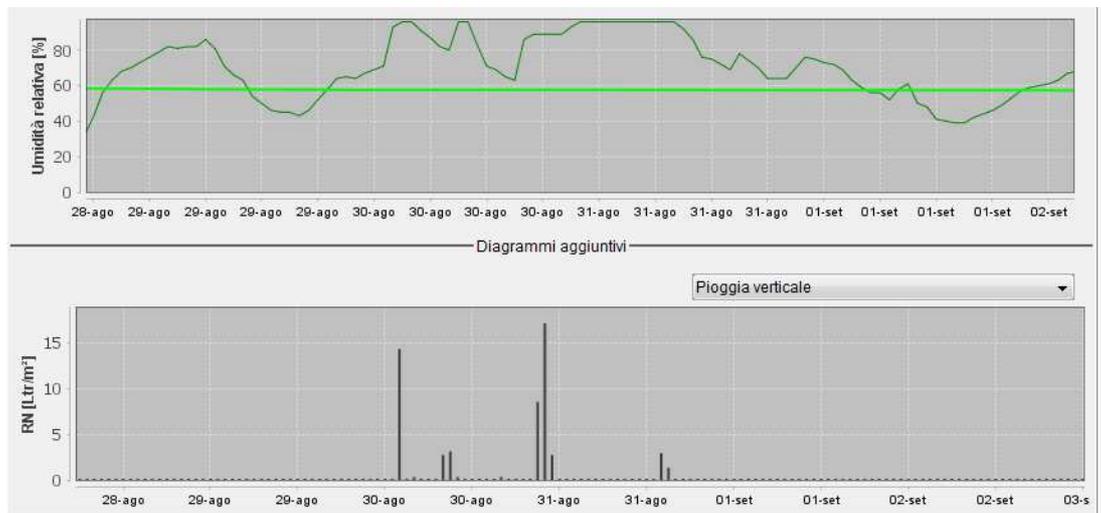


Figura 3.5 – Zoom dei grafici dell’UR e della quantità di pioggia per la zona E2 (Milano).

3.1.2 Valutazione igrotermica: panoramica dei risultati

Se il controllo numerico del § 3.1.1 ha dato esito positivo, si può procedere all’analisi delle proprietà del componente. Si passa cioè a esaminare i risultati forniti da WUFI® in termini di contenuto d’acqua, temperatura, umidità e flussi di calore. Di seguito si offre una panoramica di tali risultati e di come essi possano essere valutati.

3.1.2.1 *Contenuto d'acqua*

Nella sezione “grafici riassuntivi”, WUFI® restituisce automaticamente una serie di diagrammi, tra cui quello del contenuto d'acqua totale (Figura 3.6) e in ogni strato (Figura 3.7) della soluzione tecnica simulata. Per mezzo di questi grafici è possibile eseguire delle prime valutazioni qualitative dei risultati offerti dalla simulazione:

- Per prima cosa è bene controllare se e quando la soluzione tecnica raggiunge il cosiddetto equilibrio dinamico con l'ambiente, una volta superata cioè la fase di transitorio dovuta all'influenza delle condizioni iniziali (cfr. Figura 3.8). Nei primi anni di simulazione, infatti, si può avere un aumento o una diminuzione del contenuto d'acqua totale (cfr. Figura 3.6), che è da considerarsi normale se il valore di umidità imposto come condizione iniziale sia superiore o inferiore a quello conseguito all'equilibrio sul lungo periodo.
- Solo una volta che il componente ha raggiunto l'equilibrio con l'ambiente al contorno si possono effettuare valutazioni igrotermiche di tipo quantitativo (cfr. § 3.2.2) e decidere se il contenuto d'acqua raggiunto è accettabile o meno, valutando strato per strato.
- Se il contenuto totale d'acqua diminuisce negli anni significa che il componente si sta asciugando. Questa situazione è generalmente non problematica. Tuttavia, se la chiusura non raggiunge l'equilibrio dinamico, si può rilanciare la simulazione con umidità iniziale leggermente più bassa.
- Un contenuto totale d'acqua crescente negli anni, senza raggiungimento dell'equilibrio, è indice invece di un potenziale problema. Ciò può significare, infatti, che l'intera soluzione tecnica accumula acqua, che non è in grado di smaltire all'esterno, con conseguenti problemi di condensa, muffa, corrosione, ecc. Anche in questo caso è raccomandabile rilanciare la simulazione con umidità iniziale più alta per vedere se si raggiunge l'equilibrio con l'ambiente.
- Variazioni periodiche stagionali della quantità d'umidità totale sono normali e in genere accettabili, se non vi sono grandi oscillazioni.
- Se l'analisi qualitativa del contenuto d'acqua totale ha dato esito positivo, cioè se il componente ha raggiunto l'equilibrio dinamico, è opportuno controllare il contenuto di umidità nei singoli strati, per vedere che non vi sia accumulo anomalo di acqua in uno o più di essi (cfr. Figura 3.7). La procedura di analisi è la stessa chiarita per il contenuto d'acqua totale.
- Porre particolare attenzione all'analisi del contenuto d'acqua negli strati isolanti: un aumento di tale grandezza può implicare un significativo aumento della conducibilità termica del coibente e dunque un aumento della trasmittanza termica dell'intero componente.
- La variazione stagionale nei singoli strati può dipendere da quella dell'intera chiusura o dalla redistribuzione dell'umidità all'interno dell'elemento. Anche per questo motivo è bene analizzare il contenuto d'acqua nei singoli strati.

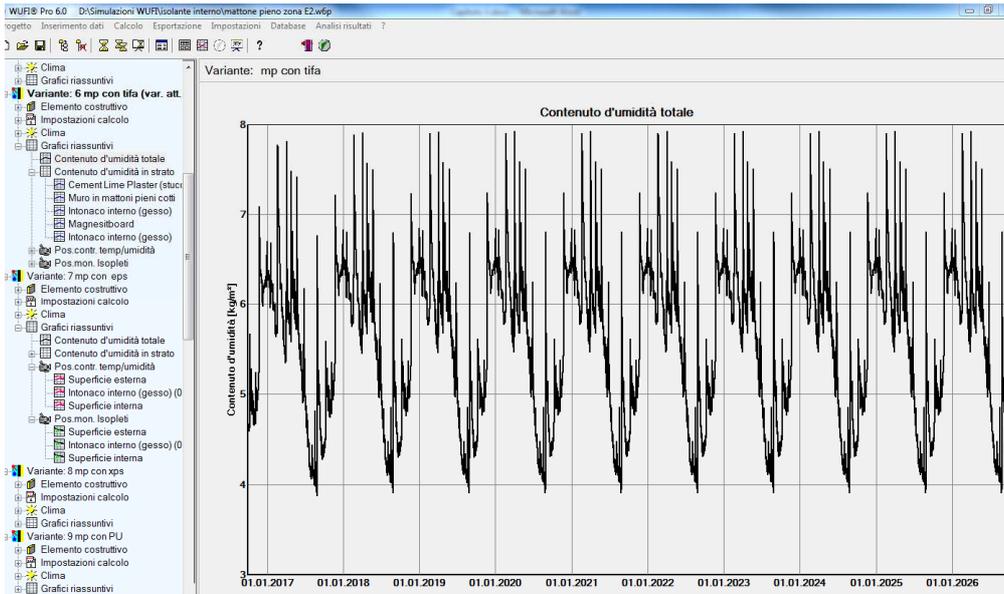


Figura 3.6 – Grafico dell'contenuto d'acqua totale.

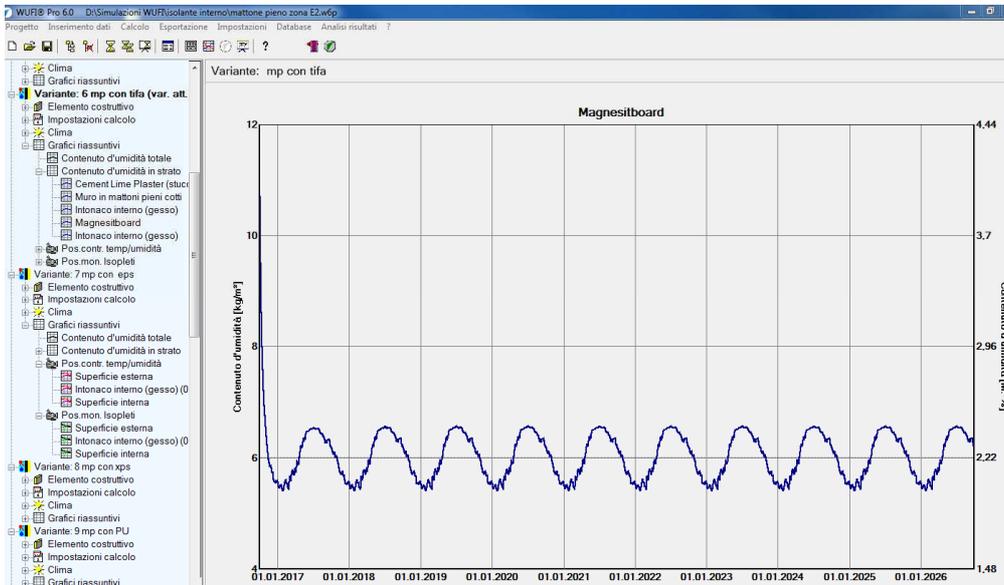


Figura 3.7- Grafico del contenuto d'acqua nell'isolante di tifa.

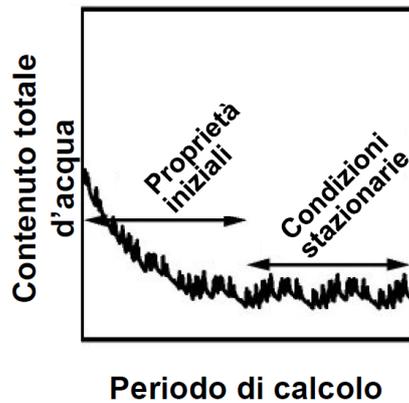


Figura 3.8 – Andamento tipo dei grafici del contenuto d'acqua, in cui si distingue una fase iniziale transitoria e una fase finale di equilibrio dinamico.

3.1.2.2 *Profili di temperatura e umidità*

In questa sezione sono presenti i diagrammi sull'andamento della temperatura (in rosso) e dell'umidità (in verde) sulla superficie esterna, interna e delle posizioni monitor scelte dall'utente. In Figura 3.9 è visibile, a titolo di esempio, l'andamento di umidità e temperatura all'interno della soluzione tecnica, nella posizione di controllo posta sul lato freddo dello strato isolante.

Anche in questo caso è bene compiere una prima valutazione qualitativa sulla correttezza dei risultati:

- Nei primi anni di simulazione si può avere un aumento o diminuzione dell'umidità, che è da considerarsi normale se il valore iniziale imposto nelle condizioni iniziali è superiore o inferiore a quello effettivamente conseguito nello stato di equilibrio dinamico, esattamente come già spiegato a proposito del contenuto d'acqua.
- Se l'umidità raggiunge picchi molto alti durante il periodo di calcolo o se essa aumenta nel tempo, ciò può essere indice di potenziale rischio di accumulo di condensa, di crescita microbiologica o corrosione.

Per le stesse posizioni (superficie esterna, interna e monitor) è possibile visualizzare l'andamento della temperatura nella soluzione tecnica e confrontarla con la temperatura di rugiada, per verificare l'eventuale formazione di condensa superficiale e interstiziale, in maniera analoga al metodo di Glaser. Differentemente da questo, però, la valutazione non è stazionaria ma dinamica e non considera solo la diffusione ma tutti i fenomeni fisici che il programma è in grado di simulare. A titolo di esempio si osservi il grafico di Figura 3.10, per la valutazione della formazione di condensa sul lato freddo dell'isolante: la curva della temperatura (in rosso) non interseca mai quella della temperatura di rugiada (in viola), a indicare l'assenza di condensa. In caso contrario, la soluzione non risulta verificata per la formazione di condensa interstiziale e necessita ulteriori accertamenti (cfr. § 3.2.2).

Accanto a detti grafici, un utile strumento di controllo è la funzione "animazione", che permette di avere una visualizzazione istantanea dei processi di trasporto e consente una più profonda comprensione dei fenomeni coinvolti e l'identificazione delle posizioni critiche. In contemporanea si può osservare, nella schermata, lo svolgimento temporale dei profili (inclusi picchi e oscillazioni varie) di contenuto d'acqua, temperatura e umidità, l'andamento dei flussi termici e umidi, la presenza di pioggia e soleggiamento. Un esempio di quanto detto è visibile in Figura 3.11. Nel caso si voglia valutare i profili sopra citati in un punto specifico della soluzione tecnica, è possibile esportarli, selezionando direttamente la posizione monitor d'interesse; si ottengono così dei grafici simili a quello visibile in Figura 3.9.

Sempre nella Figura 3.11 è visibile, in alto a destra, l'orologio della simulazione, che indica il passo temporale del calcolo e che permette di individuare in quale momento della simulazione si sono presentati errori di convergenza (il quadrante diventa rosso), così da poter concentrare le verifiche dei risultati su intervalli più ridotti.

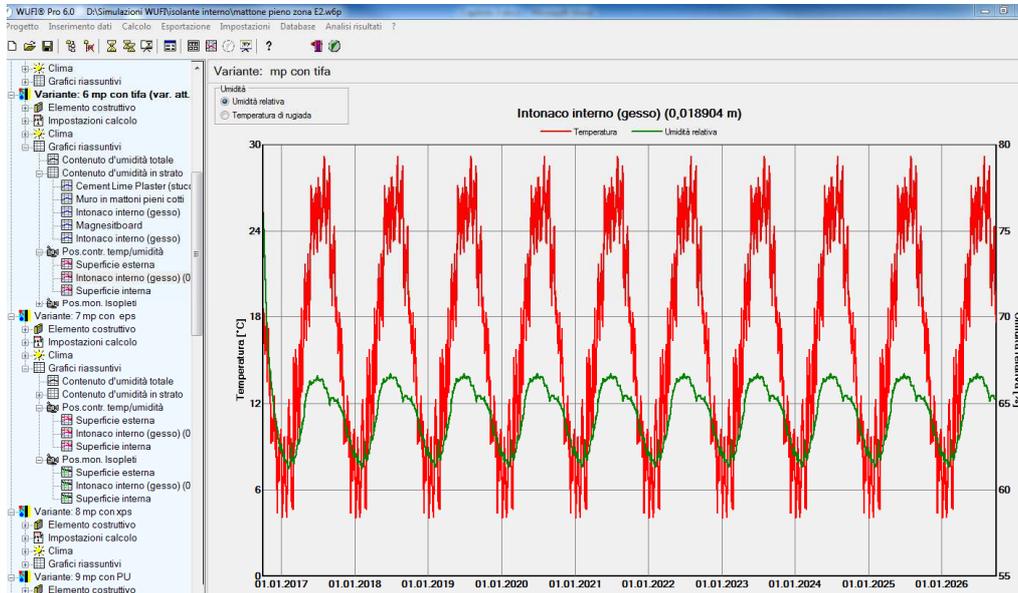


Figura 3.9 – Grafici dell'andamento di temperatura e umidità relativa sul lato freddo dell'isolante.

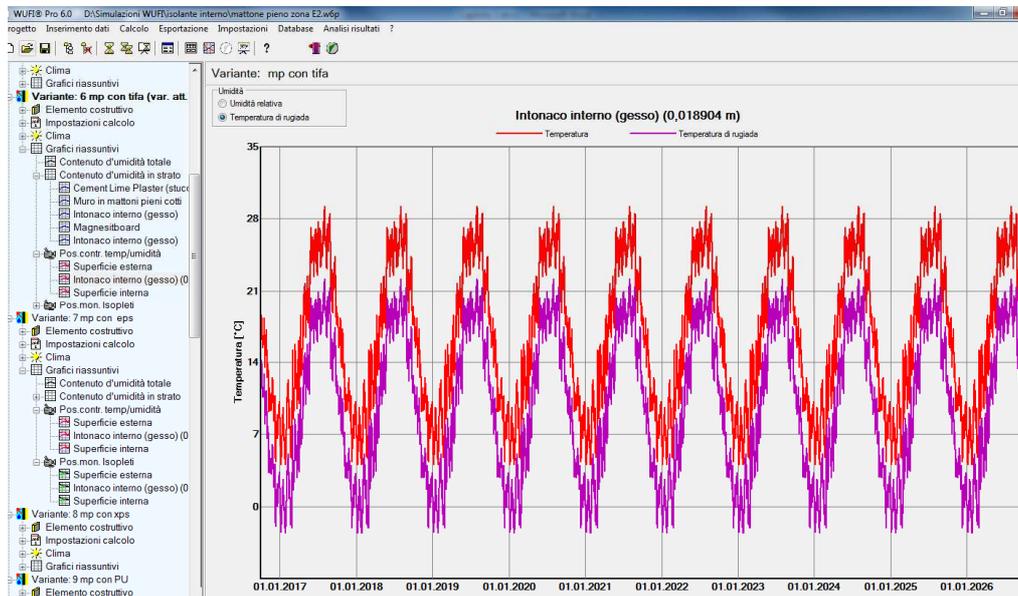


Figura 3.10 – Grafico della temperatura di rugiada sul lato freddo dell'isolante.

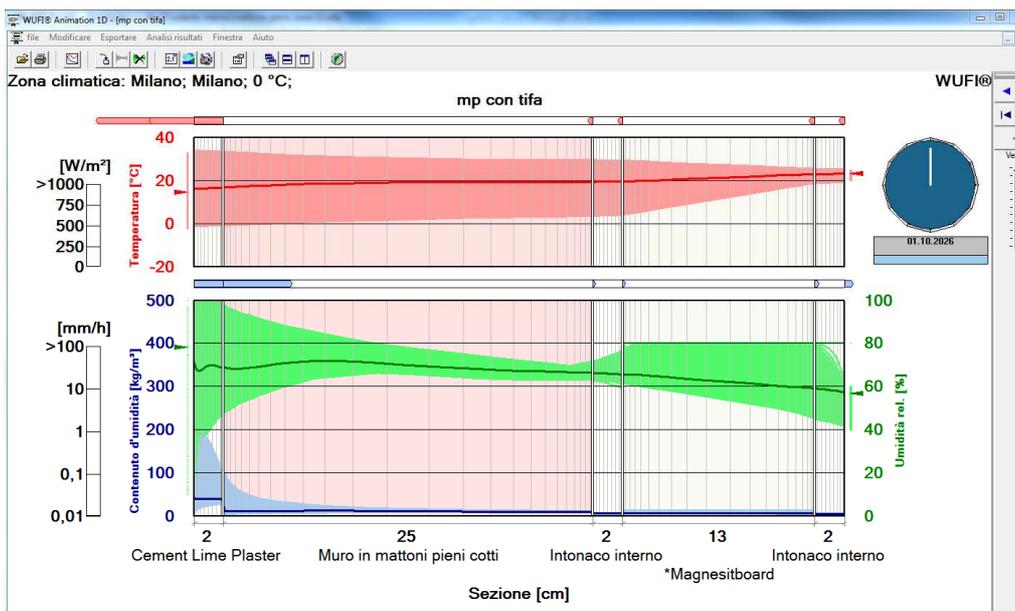


Figura 3.11 – Filmato dello sviluppo della simulazione con in evidenza l'andamento del contenuto d'acqua, temperatura e umidità, flussi termici e umidi, pioggia e radiazione solare.

3.1.2.3 Isoplete

La Figura 3.12 mostra un tipo particolare di diagramma, detto delle isoplete, in cui l'umidità relativa sulla superficie esterna, interna e nelle posizioni di controllo/monitor è rappresentata in funzione della temperatura. Tale grafico contiene anche un'informazione temporale, in quanto all'inizio del calcolo i punti sono di colore giallo e diventano progressivamente più scuri, fino a diventare neri alla fine della simulazione. Ciò consente di riconoscere quanto spesso si ripresentano certe condizioni igrotermiche nella sezione analizzata.

Inoltre il grafico mostra le isoplete limite (LIM B I e LIM B II.)⁷, che definiscono l'umidità relativa e la temperatura limite al di sopra delle quali è possibile la crescita microbiologica. Al di sotto di dette curve la formazione di muffa non è fisicamente possibile; al di sopra di esse la soluzione tecnica si trova in una condizione per cui la formazione di muffa è possibile ma non certa. Essa dipende infatti anche da altri fattori, quali il tempo di permanenza in determinate condizioni igrotermiche tali da permettere la crescita microbiologica, la presenza di radiazione UV, pioggia, ecc. Per tenere conto di tutti questi fattori si può ricorrere a WUFI® Bio (cfr. § 3.1.2.4), uno dei moduli di post-processing di WUFI®.

⁷ LIM B I è la curva limite per materiali facilmente degradabili come legno, carta da parati, pannelli di cartongesso, ecc. LIM B II è la curva limite per materiali porosi come intonaci, alcuni tipi di legno, isolanti a celle aperte, ecc.

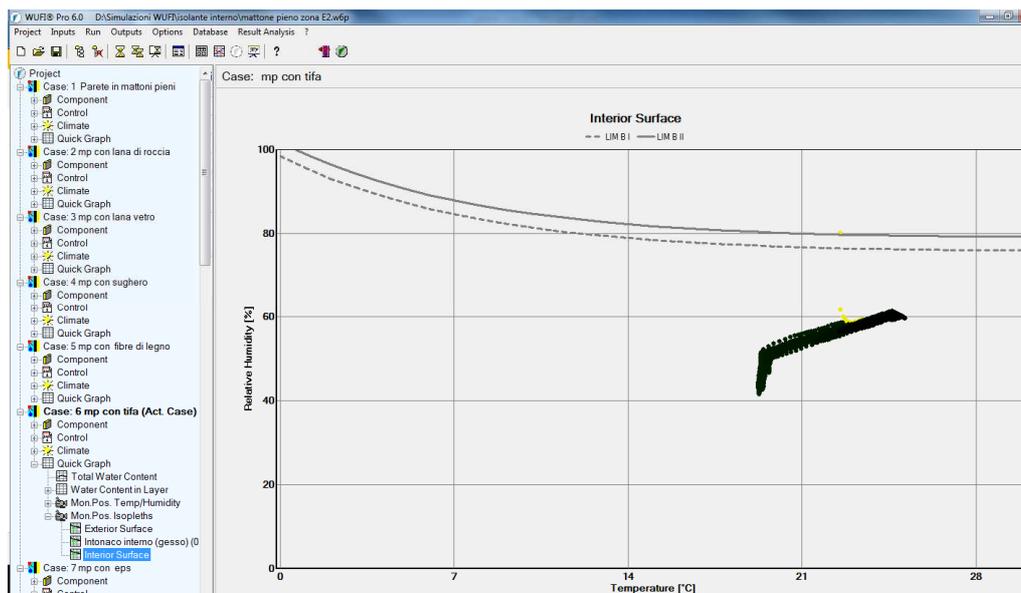


Figura 3.12 – Grafico dell'isoplethi sulla superficie interna del componente.

3.1.2.4 Moduli di post-processing per la valutazione dei risultati

I moduli post-processing sono programmi che sfruttano i dati di uscita di WUFI® per compiere ulteriori analisi. Questi sono degli add-on che compaiono sulla barra del menù di WUFI® e sono:

- WUFI® Bio, per valutare il rischio di formazione di crescita microbologica;
- WUFI® Corr per valutare il rischio di corrosione;
- Trasmissione termica in regime dinamico per verificare le prestazioni termiche si sensi della norma tedesca DIN 4108 [14].

Modulo WUFI® Bio

WUFI® Bio valuta il rischio di muffa in base alle condizioni igrotermiche delle superfici interne (per altre superfici i risultati non sono validati, l'esperienza fa però ritenere che siano attendibili): il post-processor confronta temperatura, UR e contenuto d'acqua della superficie con le condizioni critiche che permettono la germinazione delle spore, simulando la crescita e diffusione dei microrganismi. WUFI® Bio considera le spore come fossero materiali con determinate caratteristiche superficiali (s_d e A) e un definito contenuto d'acqua (caratteristiche determinate a seguito di una serie di prove di laboratorio effettuate dal Fraunhofer IBP), così da definire le condizioni limite al di sopra delle quali si ha la formazione di muffa (Figura 3.13).

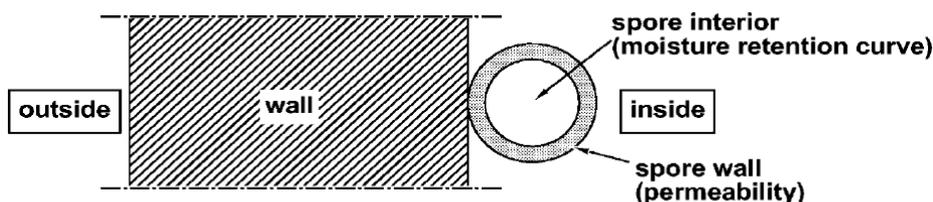


Figura 3.13 - Modello di spora in WUFI® Bio.

Avviato il software, si apre la schermata mostrata in Figura 3.14, dove si richiede di specificare la classe del substrato, che determina i criteri di germinazione e di crescita delle muffe. Il programma distingue tre classi, che descrivono le caratteristiche dei nutrienti accessibili alle spore:

- Ottimali 0, nel caso di coltura biologica in laboratorio;
- Biodegradabili 1, nel caso di legno, carta da parati, ecc.;
- Non biodegradabili 2, nel caso di materiali edili minerali.

È presente anche un'ulteriore classe K che definisce le condizioni di crescita di muffa pericolose per la salute dell'uomo. In Figura 3.14 sono anche presenti le proprietà delle spore secondo la classe di appartenenza, quali:

- La curva di ritenzione idrica;
- La resistenza alla diffusione;
- Rapporto crescita - indice di muffa.

In Figura 3.15 sono visibili i risultati della valutazione del rischio muffa. Il diagramma in alto mostra il contenuto d'acqua delle spore (linea blu) e il contenuto d'acqua critico (linea rossa). Se l'acqua contenuta nelle spore supera il limite, si presume che queste germinino e si sviluppi il micelio. Il diagramma in basso mostra il livello di crescita della muffa sia attraverso la crescita in mm oppure attraverso il *Modul Index*, articolato su sei livelli (cfr. Tabella 3.1), che descrive la porzione di superficie infestata. Inoltre è presente un semaforo, che offre una valutazione immediata del rischio muffa e della gravità della contaminazione (cfr. Figura 3.16).

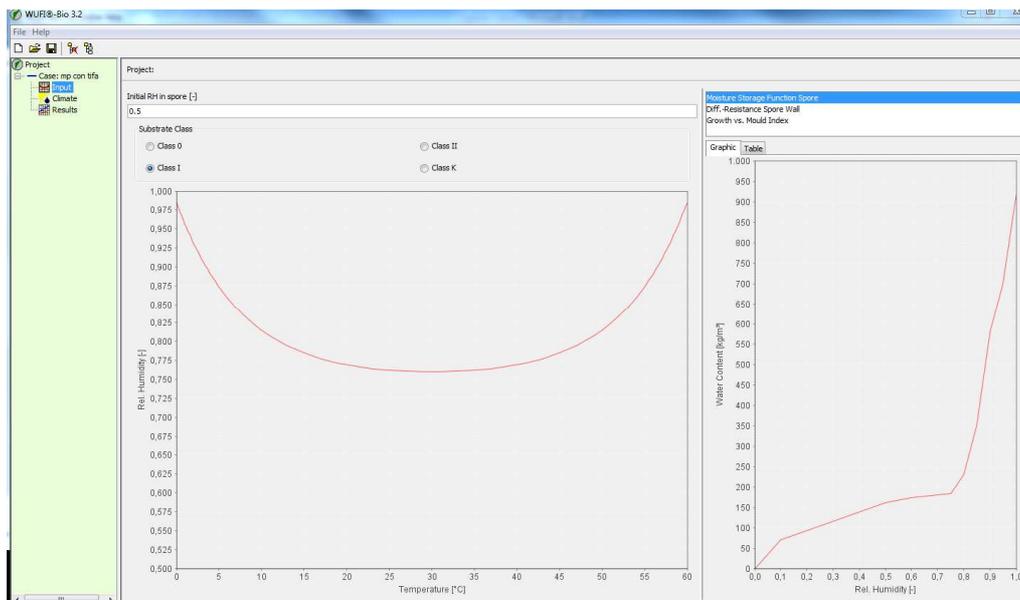


Figura 3.14 – Sezione "Input" di WUFI® Bio.

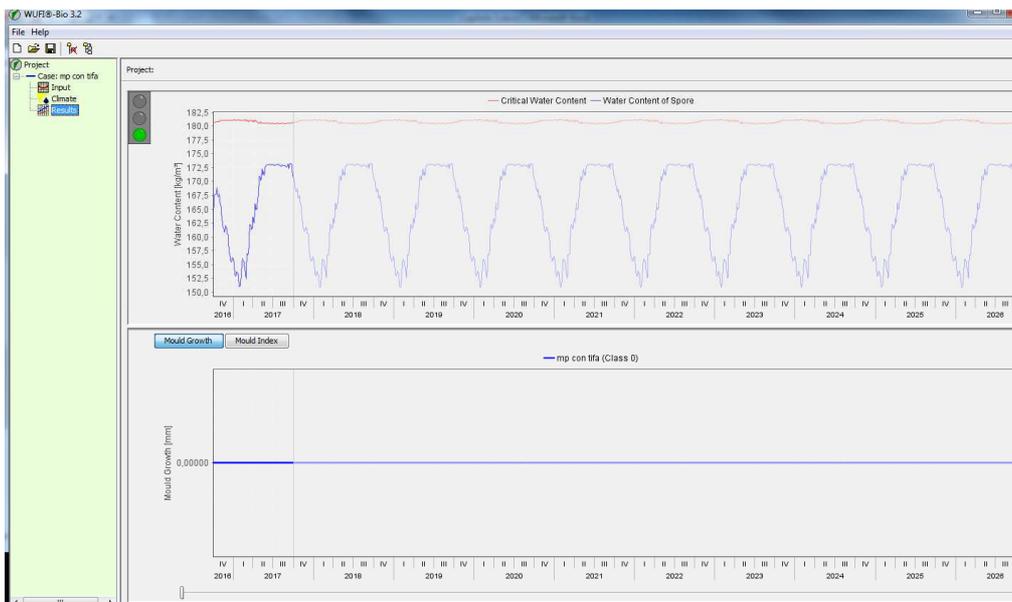


Figura 3.15 – Sezione “Risultati” di WUFI® Bio.

Tabella 3.1 – Descrizione dei valori del *Mould Index*.

Indice	descrizione
0	nessuna crescita
1	crescita bassa, visibile solo al microscopio
2	crescita moderata, visibile solo al microscopio, copertura maggiore del 10%
3	crescita visibile a occhio nudo
4	crescita visibile a occhio nudo, copertura maggiore del 10%
5	copertura maggiore del 50%
6	copertura completa, 100%

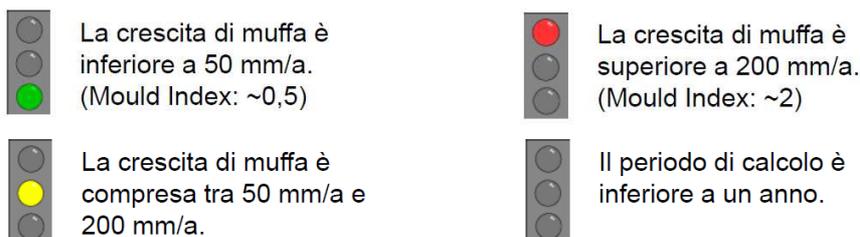


Figura 3.16- Interpretazione della segnaletica del semaforo.

Modulo WUFI® Corr

WUFI® Corr fornisce una previsione della velocità di corrosione da carbonatazione delle armature in funzione delle condizioni igrotermiche. Il programma è validato solo per le malte storiche (malte a base di calce, gesso e calci idrauliche) e in futuro saranno inseriti anche i limiti per il calcestruzzo.

In Figura 3.17 è visibile la schermata dei dati di input del post-processore, con un esempio delle condizioni di corrosione per una malta di gesso. La velocità di corrosione è espressa in funzione delle condizioni di temperatura e umidità presenti

all'interfaccia tra armatura e malta: le zone in verde rappresentano velocità di corrosione trascurabile, quelle gialle indicano condizioni potenzialmente dannose e quelle in rosso condizioni di forte corrosione. Una volta scelto il materiale a contatto con l'armatura e importati i dati igrotermici determinati con WUFI[®], il programma calcola la velocità di corrosione prevista in termini di densità di corrente [mA/m^2] o velocità di penetrazione [$\mu\text{m}/\text{anno}$], visibile nel grafico superiore di Figura 3.18. Nella parte inferiore dell'immagine è visibile la penetrazione complessiva della corrosione [μm] durante tutto il periodo di simulazione. Come criterio di valutazione si adotta la soglia di $1 \mu\text{m}/\text{anno}$: al di sotto di tale valore la corrosione può dirsi trascurabile.

Nel caso della malta di gesso visibile in Figura 3.17, ad esempio, a 10°C si hanno rischi di degrado solo per UR maggiori di 95 %, mentre a 25°C la stessa umidità provoca seri problemi di corrosione, la quale non si innesca prima di aver raggiunto 86 % UR. Nel caso delle malte idrauliche, che per composizione chimica sono più simili al calcestruzzo e dunque usate al momento nel programma come riferimento per quest'ultimo, si hanno problemi di corrosione a partire da 10°C con 94 % UR, mentre a 25°C serve l'85 % UR e a 40°C l'80 % per riscontrare rischio di corrosione. Alcuni studi sul calcestruzzo più cautelativi, indicano un rischio di corrosione già a partire da 80 % UR a 20°C . In caso di acqua liquida presente in prossimità dell'armatura, invece, a prescindere dalla temperatura e dalla tipologia di legante a contatto con essa si hanno seri problemi di degrado, con velocità di corrosione che raggiungono un massimo di $200 \mu\text{m}/\text{anno}$.

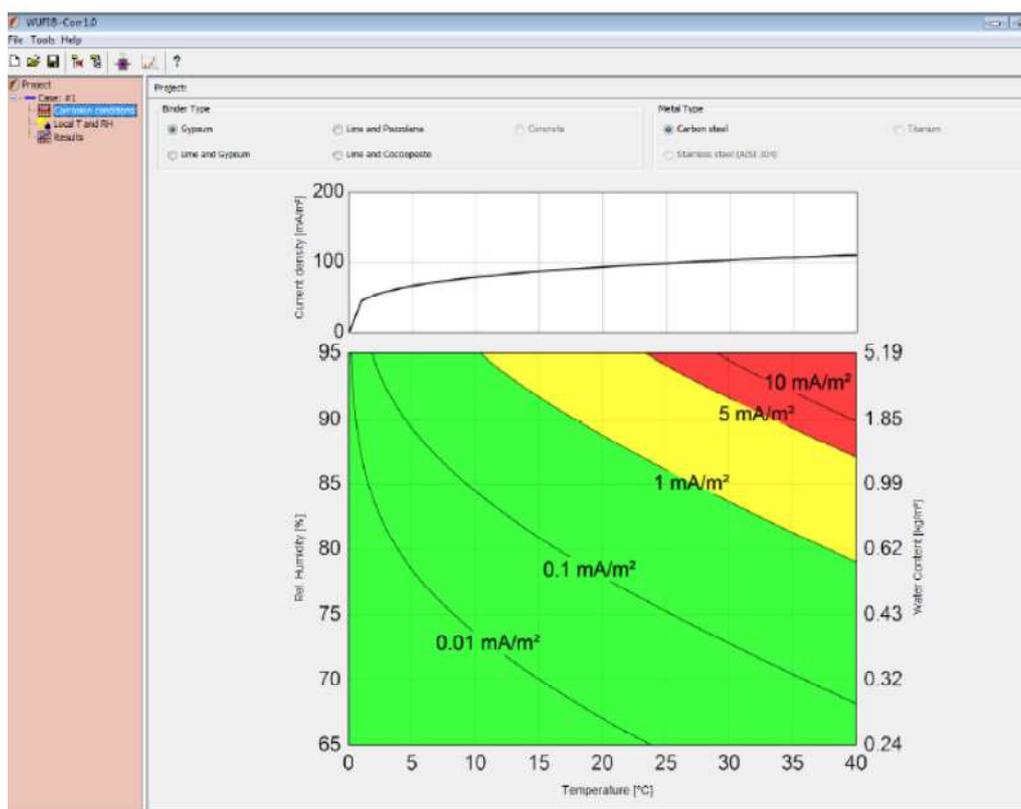


Figura 3.17 – Sezione "Input" di WUFI[®] Corr.

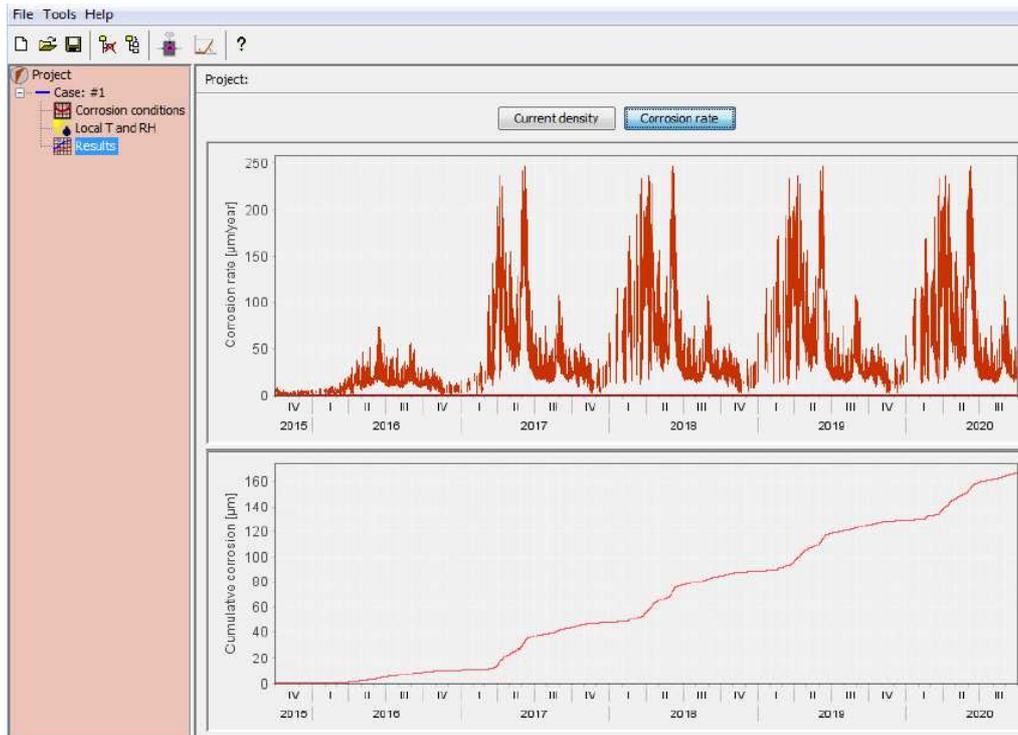


Figura 3.18 – Sezione “Risultati” di WUFI® Corr.

Modulo per la trasmittanza dinamica

Questo post-processor permette di valutare la trasmittanza della soluzione tecnica in regime non stazionario, considerando inoltre l’influenza di umidità, radiazione solare, calore latente, ecc.

In Figura 3.19 è visibile la schermata del programma: il grafico superiore mostra i valori mensili della trasmittanza termica dinamica (punti blu), che sono confrontati con i valori di riferimento per la stessa soluzione tecnica in condizioni asciutte (linea nera), a 80 % UR (linea azzurra) e con acqua di cantiere (linea verde); il grafico inferiore mostra e confronta tutti i casi simulati.

I valori limite per U1 e U2 (dove U1 è pari a 0.73 W/m²K mentre U2 vale 1.39 W/m²K) si basano sulle prestazioni termiche minime richieste, ovvero:

- R1 = 1.2 m²K/W, ai sensi della norma tedesca DIN 4108-2 (2003)
- R2 = 0.55 m²K/W, ai sensi della norma tedesca DIN 4108-2 (1981).

La presenza del semaforo indica il rispetto (o meno) di tali normative, cambiando colore a seconda che i mesi esaminati abbiano valori di trasmittanza superiori o inferiori al limite stabilito (cfr. Figura 3.20).

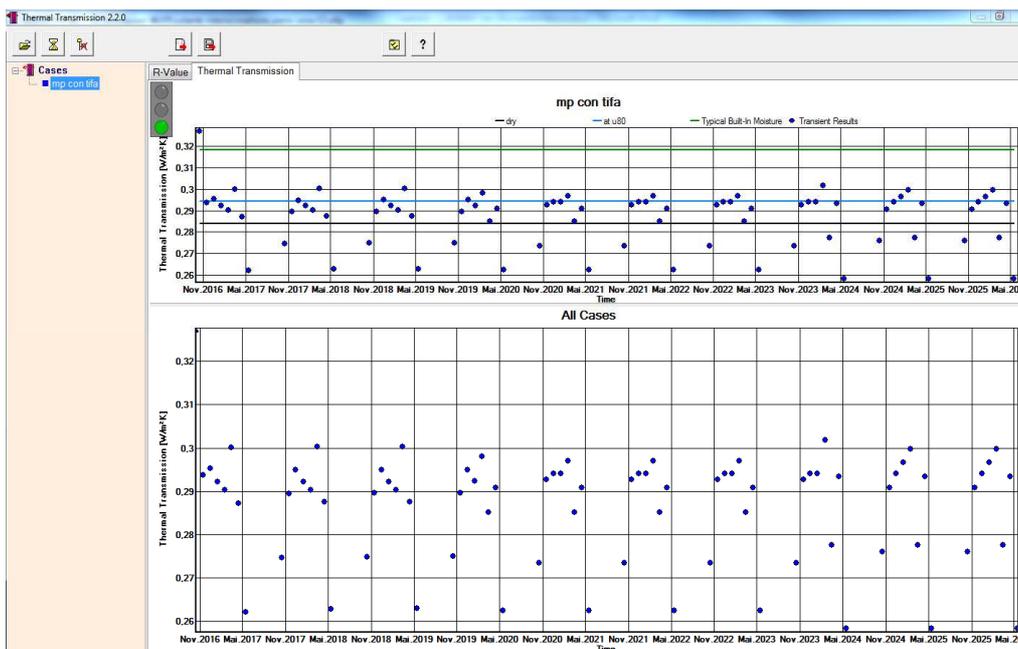


Figura 3.19 – Grafici della trasmittanza termica dinamica.

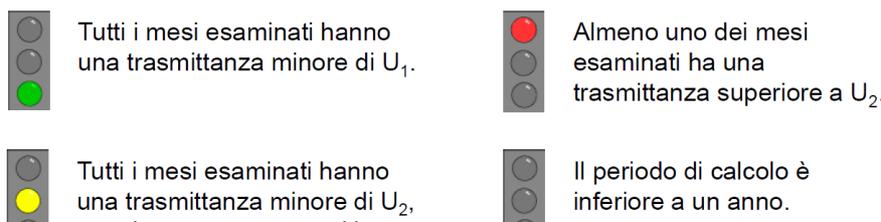


Figura 3.20 – Interpretazione della segnaletica del semaforo.

3.2 Valutazione igrotermica: caso studio

3.2.1 Esportazione dei risultati

Oltre ai grafici standard resi disponibili dal programma al termine della simulazione, l'utente ha facoltà di esportare tutti i risultati del calcolo come file ASCII per ulteriori elaborazioni e analisi.

Per procedere con l'esportazione dei dati è necessario selezionare "esportazione ASCII" dal menù a tendina che si apre in alto cliccando su "esportazione". Si apre allora una finestra del tutto simile a quella visibile in Figura 3.21, che contiene l'elenco dei dati scaricabili. Questi sono o andamento nel tempo di una particolare grandezza in un punto specifico della chiusura simulata, oppure i profili iniziali e finali di umidità relativa, temperatura e contenuto d'acqua. Una volta messe le spunte ai dati che si intende esportare, occorre nominare il file di esportazione e sceglierne la collocazione, per poi cliccare su "esporta nel file" per generare il file e effettuare l'esportazione. Si seleziona poi OK per terminare la procedura. Il file così generato avrà tante colonne quanti i dati selezionati, che saranno disposti secondo l'ordine

elencato in WUFI®. In più è presente una prima colonna con la scala temporale. Nel nostro caso, ad esempio, avendo sempre simulato dieci anni, ci sono 87600 righe di testo per ogni grandezza esportata.

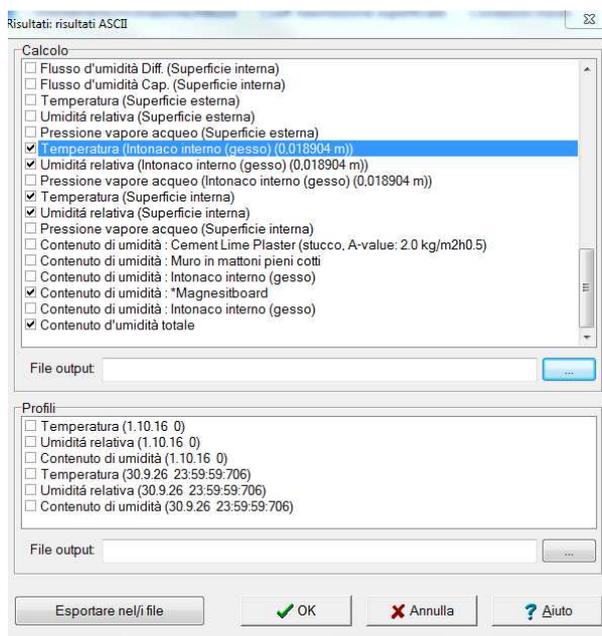


Figura 3.21 – Finestra di esportazione ASCII dei risultati.

Per questo studio si sono esportati i dati visibili in Tabella 3.2. Per ciascuna voce sono stati definiti intervalli temporali differenti (primo anno, ultimo anno e intero periodo simulato) per valutare, in modo quantitativo e qualitativo, i cambiamenti subiti dalla soluzione tecnica e per verificare se alcune problematiche (approfondite nel § 3.2.2) permangono nel tempo o scompaiono dopo i primi anni.

Tabella 3.2 – Elenco dei parametri esportati nei file ASCII.

File ASCII		UM	Verifica
Contenuto d'acqua	totale	[kg/m ²]	diminuzione potenziale asciugamento
Contenuto d'acqua	isolante	[kg/m ³]	decadimento prestazioni energetiche
Flusso di calore	interno	[W/m ²]	decadimento prestazioni energetiche
Temperatura	MP1	[°C]	da valutare in combinazione con UR
Umidità relativa	MP1	[%]	condensazione superficiale
Temperatura	MP2	[°C]	attacco gelo-disgelo
Umidità relativa	MP2	[%]	attacco gelo-disgelo
Temperatura	MP3	[°C]	attacco biologico
Umidità relativa	MP3	[%]	attacco biologico
Temperatura	MP4	[°C]	attacco biologico
Umidità relativa	MP4	[%]	attacco biologico

3.2.2 Criteri di controllo

I limiti qui esposti sono stati applicati e controllati per ognuna delle soluzioni tecniche simulate. Per i riferimenti normativi e scientifici si rimanda al primo capitolo.

3.2.2.1 *Condensa superficiale e interstiziale*

Si ha condensa superficiale se:

- La temperatura superficiale è inferiore o uguale a quella di rugiada;
- Il contenuto di vapore nell'aria cresce fino al raggiungimento della saturazione.

La condensa interstiziale si manifesta se materiali con basse capacità d'assorbimento, a contatto con elementi igroscopici, producono all'interno della soluzione tecnica un accumulo d'acqua tale da bloccare il normale processo di diffusione del flusso di vapore e di redistribuzione del contenuto d'acqua (solitamente nel caso di barriere al vapore applicate a lana minerale).

Nelle simulazioni dinamiche si valuta la formazione di condensa controllando se l'umidità relativa dello strato (o di porzioni di esso) raggiunga il 100 % UR. In tal caso, si compie un'ulteriore analisi: si separa, nella sezione "Stratigrafia", un 1 mm di spessore del materiale che si vuole studiare e si avvia la simulazione, controllando se esso raggiunga il limite di saturazione: se ciò accade, si ha condensa.

Nella prassi sono forniti talvolta limiti più stringenti sul contenuto d'acqua che i materiali dovrebbero avere per evitare problemi. Tali limiti sono stati adottati anche in questo studio. Alcuni di essi, come per il legno, sono dati dalle norme nazionali ed europee (cfr. § 1.4.3), ovvero 20 M.% per il legno massiccio e 18 M.% materiali lignei; per l'arenaria è posto un limite di 12 M.%, che, in mancanza di valori standardizzati, può essere applicato anche ad altri tipi di muratura. Per i materiali isolanti invece i limiti dovrebbero essere forniti dalle case produttrici, ad esempio è indicato un valore limite del contenuto d'acqua pari a 9 kg/m^3 (che corrispondono all'equilibrio con 80 % UR) per il silicato di calcio; nel caso, più comune, in cui ciò non avvenga, tali limiti possono essere stabiliti da chi esegue la simulazione, deducendoli dal decadimento della conducibilità termica in funzione del contenuto d'acqua. Fissata la trasmittanza massima di progetto, si calcola cioè quale sia il valore massimo di conducibilità dell'isolante che serve a garantirla e si vede nella tabella dei materiali per quale valore di contenuto d'acqua o UR tale limite di conducibilità viene raggiunto.

3.2.2.2 *Rischio di formazione di muffa*

Come già spiegato in § 1.3.2, se le spore della muffa sono a contatto con l'aria dell'ambiente interno, esse potrebbero intaccare la salubrità dell'aria ed essere addirittura nocive per la salute dell'uomo. La crescita microbiologica può avere inizio

per umidità maggiori di 80 % UR. Il ruolo della temperatura non è però trascurabile. Pertanto, i risultati delle simulazioni effettuate sono stati valutati usando come primo criterio quello dell'80 % UR e successivamente verificati uno a uno con WUFI® Bio.

I punti della soluzione tecnica da analizzare sono principalmente la superficie interna e il lato caldo dell'isolamento interno (ovvero a stretto contatto con l'aria interna), anche se è possibile la formazione di muffa sulla superficie esterna o sul lato freddo dell'isolamento interno (cfr. Figura 1.6). A questo proposito è importante controllare, in fase di messa in opera, che non vi siano cavità all'interno delle quali possa circolare aria.

3.2.2.3 *Attacco gelo-disgelo*

Intonaco e murature possono essere danneggiati nella loro struttura per l'aumento di volume dovuto al congelamento dell'acqua. È importante quindi evitare umidità maggiori di 95 % UR in concomitanza con temperature inferiori a 0 °C, per evitare la saturazione del 90 % dei pori. Tali limiti si applicano solo per materiali sensibili al gelo. Il punto della chiusura da controllare, a questo riguardo, è il lato freddo dell'isolante, sia esso a cappotto o interno.

3.2.2.4 *Diminuzione del potenziale di asciugamento*

La diminuzione del potenziale d'asciugamento non rappresenta un problema se questo non porta a un aumento della quantità di umidità nella soluzione sul lungo periodo, provocando i problemi già descritti (cfr. § 3.2.2.1 e § 3.2.2.2).

Va detto a questo proposito che le chiusure isolate dall'interno soffrono particolarmente di questo problema (cfr. Figura 1.8) e che pertanto è importante garantire un'adeguata protezione contro la pioggia, eventualmente utilizzando trattamenti idrorepellenti o intonaci con particolari valori di s_d e A come raccomandato dalle WTA (cfr. Figura 1.15).

3.2.2.5 *Decadimento delle prestazioni energetiche*

L'umidità, oltre ai problemi descritti in § 1.3.2, provoca anche il decadimento delle proprietà termiche dei materiali. Nel caso di materiali isolanti bagnati, per esempio, si ha un aumento della conduttività termica proporzionalmente all'aumento del contenuto d'acqua dell'isolante stesso.

3.2.2.6 *Corrosione dei metalli*

Per il calcestruzzo, in via cautelativa, si raccomanda di non superare l'80 % UR. Qualora si superi questo valore è necessario fare ulteriori verifiche con WUFI® Corr per valutare l'influenza della temperatura sul fenomeno elettrochimico. Nel caso di malte, si vedano direttamente i limiti esposti in § 3.1.2.4.

3.2.3 Analisi di soluzioni tecniche con isolamento esterno

Si procede ora all'analisi igrotermica vera e propria dei risultati delle simulazioni effettuate. Qui si considerano le soluzioni tecniche isolate dall'esterno, mentre nel paragrafo successivo (cfr. § 3.2.4) si affrontano quelle isolate dall'interno. Le chiusure con isolamento in intercapedine (si tratta in realtà solo di un caso), vengono omesse, ma l'analisi risulta analoga a quella condotta per l'isolamento a cappotto.

Per brevità si è scelto di analizzare nel dettaglio, a titolo di esempio, una sola tipologia costruttiva, ovvero la parete con mattoni pieni, partendo dalla zona C1 ed estendendo poi l'analisi alle altre aree climatiche, in caso di sostanziali differenze.

Per la visione completa di tutti i risultati delle simulazioni si rimanda all'Appendice, Figura A.30-Figura A.144 e Tabella A.25-Tabella A.105.

3.2.3.1 *Contenuto totale d'acqua*

In Figura 3.22 è visibile l'andamento del contenuto d'acqua nella muratura in mattoni pieni in zona C1. Per l'isolamento esterno sono stati presi in esame sei diversi tipi d'isolante: EPS (in nero), PE (in rosso) e XPS (in verde scuro) come coibenti sintetici; lana minerale (in azzurro) e silicato di calcio (in arancione) come isolanti di origine minerale; la tifa (in verde chiaro), infine, come materiale vegetale. Nel grafico è riconoscibile un periodo di transitorio della durata di circa un anno, durante il quale il contenuto d'acqua scende da 6-7 kg/m² a un valore medio annuale di circa 4 kg/m². Al termine del primo anno viene dunque raggiunto l'equilibrio dinamico con l'ambiente; si registrano in questa fase ancora piccole oscillazioni di circa 1-2 kg/m² dovute alle normali variazioni stagionali. Tali osservazioni generali valgono per ogni materiale isolante studiato. Tuttavia, a un esame più attento, si nota come le chiusure con isolanti minerali abbiano un contenuto d'acqua leggermente più basso degli altri, seguite da quelle con isolanti sintetici e infine dalla chiusura isolata con tifa, che mostra un contenuto d'acqua più alto e oscillazioni stagionali di maggiore entità.

Tale comportamento diventa sempre più evidente procedendo verso zone più fredde e piovose: in zona F (Figura 3.23), la medesima chiusura isolata con la tifa mostra un contenuto d'acqua di circa 2 kg/m² maggiore rispetto alle altre soluzioni tecniche, che invece mantengono un contenuto d'acqua confrontabile con quello calcolato in C1. Risultati affini si hanno anche nelle zone C2, D ed E (cfr. Appendice, Figura A.67, Figura A.69, Figura A.71, Figura A.73, Figura A.75 e Figura A.77).

Si può comunque affermare che questo tipo di chiusura, in ogni zona climatica e a prescindere dal tipo d'isolante usato, non presenta alcun incremento dell'umidità, che raggiunge l'equilibrio dopo circa un anno e si mantiene costante nel tempo.

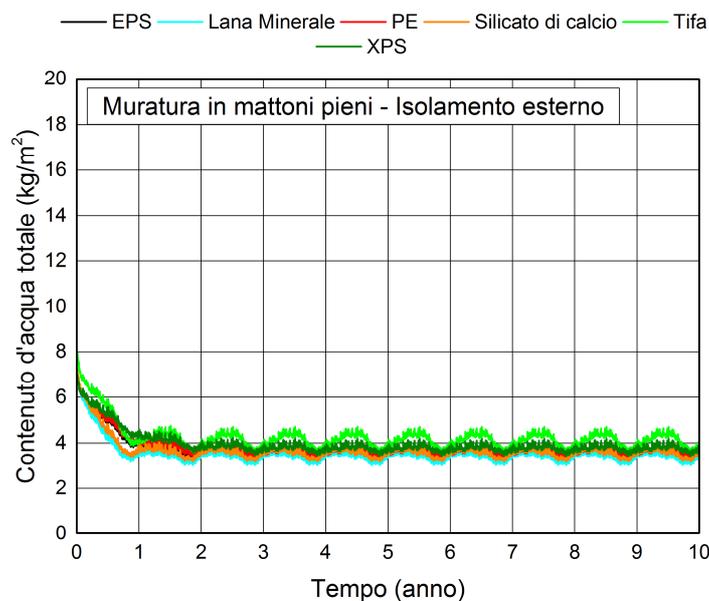


Figura 3.22 – Andamento del contenuto d'acqua totale in funzione del tempo, nella parete in mattoni pieni con isolamento esterno nella zona C1.

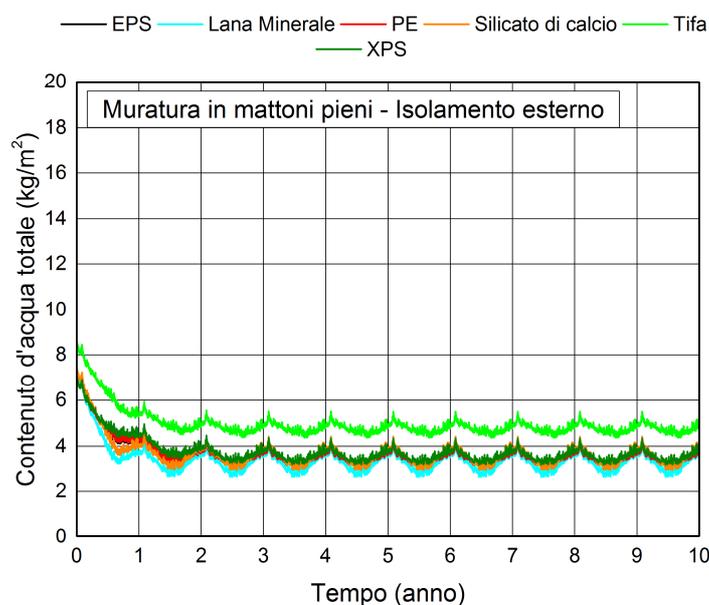


Figura 3.23 – Andamento del contenuto d'acqua totale in funzione del tempo, nella parete in mattoni pieni con isolamento esterno nella zona F.

3.2.3.2 *Contenuto d'acqua nello strato isolante*

Poiché il contenuto d'acqua totale nella soluzione tecnica si mantiene costante e su valori limitati, si è proceduto con l'analisi dello strato isolante. A questo proposito si osservi la Figura 3.24 per la zona C1: anche qui è riconoscibile un primo periodo di transitorio, con umidità decrescente rispetto all'umidità iniziale imposta. Al termine del primo anno tutti i materiali isolanti presentano contenuto d'acqua costante. In particolare, lana minerale, EPS, PE e XPS si assestano su valori medi annuali pari a circa 1 kg/m^3 e il silicato di calcio a circa il doppio; in entrambi i casi si hanno oscillazioni stagionali poco rilevanti, di circa 0.5 kg/m^3 . Nel caso della tifa, invece, si

hanno valori medi annui decisamente più alti e pari a 6.5 kg/m^3 , con oscillazioni stagionali più ampie e quantificabili in circa 3 kg/m^3 , con picchi di 8 kg/m^3 . Si ritiene comunque che tali valori non siano problematici per la soluzione tecnica, in quanto un contenuto d'acqua di 8 kg/m^3 comporta un aumento impercettibile della conducibilità termica della tifa (dell'ordine di 10^{-4} W/mK). Anche per gli altri materiali isolanti l'aumento della conducibilità termica per i contenuti d'acqua segnalati è trascurabile.

Le medesime osservazioni si possono fare per le altre zone climatiche, dove non si distinguono differenze di rilievo rispetto alla zona C1 (cfr. Appendice, Figura A.67, Figura A.69, Figura A.71, Figura A.73, Figura A.75, Figura A.77 e Figura A.79).

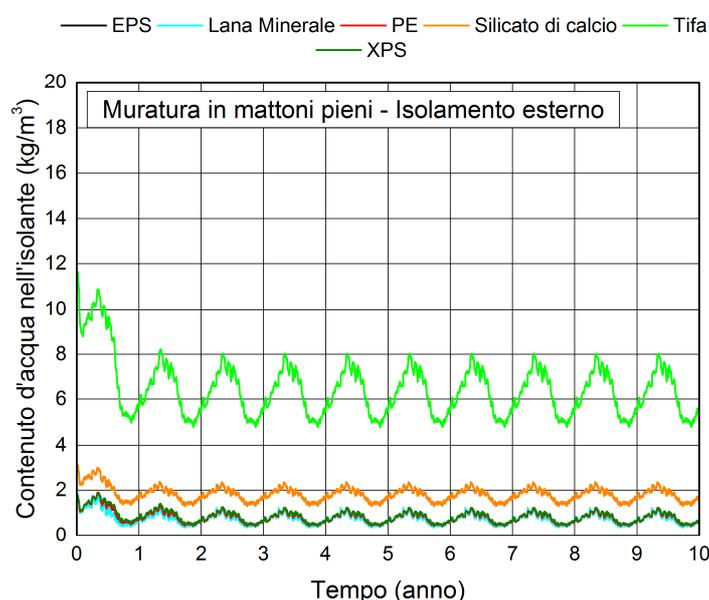


Figura 3.24 – Andamento del contenuto d'acqua nell'isolante in funzione del tempo, nella parete in mattoni pieni con isolamento esterno nella zona C1.

3.2.3.3 Temperatura e umidità relativa sul lato freddo dell'isolante

Passando ora all'analisi delle posizioni di controllo, la Figura 3.25 mostra l'andamento di temperatura (a) e umidità relativa (b) sul lato freddo dell'isolante. La campitura grigia tra 95 % e 100 % UR mostra la zona in cui potrebbe formarsi ghiaccio, a patto che le temperature siano inferiori a $0 \text{ }^\circ\text{C}$.

Osservando dunque in primo luogo il diagramma delle temperature (Figura 3.25a), si nota come questo punto della parete mantenga temperature simili, a prescindere dall'isolante usato, e costanti di anno in anno (media annua di $22 \text{ }^\circ\text{C}$), con oscillazioni tra $43 \text{ }^\circ\text{C}$ in estate e $2 \text{ }^\circ\text{C}$ in inverno, senza dunque scendere mai sotto $0 \text{ }^\circ\text{C}$. Non vi è dunque possibilità di congelamento di acqua sul lato freddo dell'isolante.

Esaminando il grafico di Figura 3.25b, si può notare come l'umidità relativa in questo punto della chiusura raggiunga l'equilibrio con l'ambiente circostante dopo circa un anno, con un leggero decremento dei propri valori iniziali. Nel primo inverno simulato si registra, infatti, un picco pari a circa 90 % UR nelle soluzioni tecniche isolate con lana minerale (in azzurro) e silicato di calcio (in arancione), 80 % UR in quelle isolate con tifa o materiali sintetici. Negli anni successivi si registrano invece massime invernali di 85 % UR per le prime, 78 % UR per le seconde. Le oscillazioni stagionali sono ampie, tanto che in estate si raggiungono umidità relative molto basse e pari a circa 35 % UR in ogni soluzione tecnica esaminata.

In relazione al rischio di attacco del gelo, non solo le temperature non scendono mai sotto 0 °C, ma anche l'umidità relativa non supera mai la soglia critica posta a 95 % UR. Si può pertanto affermare che questo tipo di soluzione tecnica, a prescindere dal tipo di isolante, non presenta problemi di gelo nella zona climatica C1.

Ripetendo lo stesso tipo di analisi nelle altre aree climatiche (cfr. Appendice, Figura A.69, Figura A.71, Figura A.73, Figura A.75, Figura A.77 e Figura A.79), si rilevano invece delle criticità nelle zone più fredde E2 ed F, i cui andamenti di temperature a umidità relativa sono riportati rispettivamente in Figura 3.26 e Figura 3.27. In particolare, nella zona E2 (cfr. Figura 3.26) si hanno minime invernali di -2 °C a cui corrispondono picchi di umidità pari a 95-96 % UR nelle chiusure isolate con lana minerale e silicato di calcio, che pertanto sono sottoposte ad attacco del gelo e vanno bocciate. Negli altri casi, invece, si raggiungono valori massimi pari solo a 90 % UR per le chiusure con isolamento sintetico, 76 % per quelle con tifa, che sono dunque prive di problemi di gelo. Considerazioni simili si possono fare anche per la zona F (cfr. Figura 3.27): anche qui, a minime di -10 °C corrispondono picchi pari a 95-96 % UR nelle chiusure isolate con lana minerale e silicato di calcio, che sono dunque da bocciare. Le soluzioni tecniche con altri isolanti sono, anche in questo caso, non problematiche per il gelo (UR max 86 % per isolanti sintetici, 76 % per tifa).

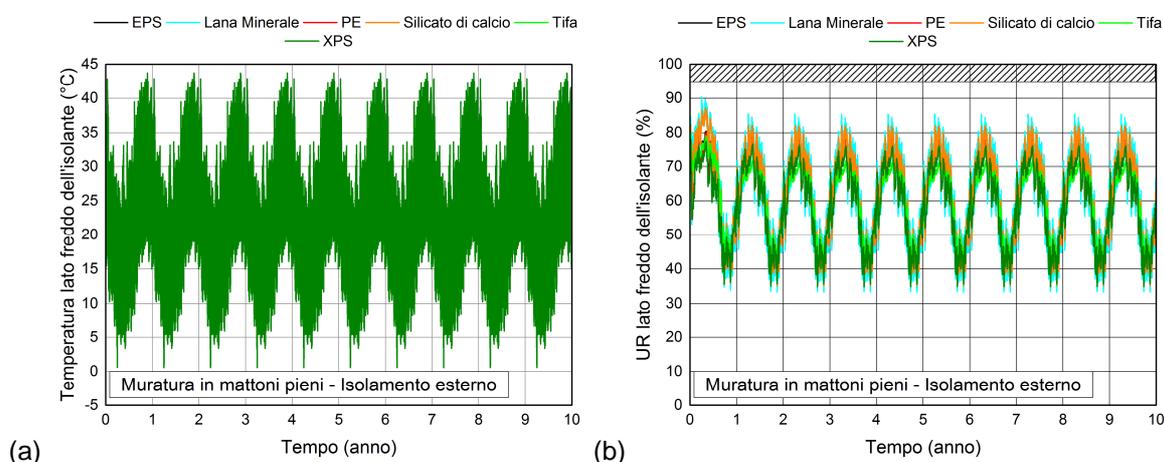


Figura 3.25 – Andamento di temperatura (a) e UR (b) in funzione del tempo, sul lato freddo dell'isolante della parete in mattoni pieni con isolamento esterno nella zona C1.

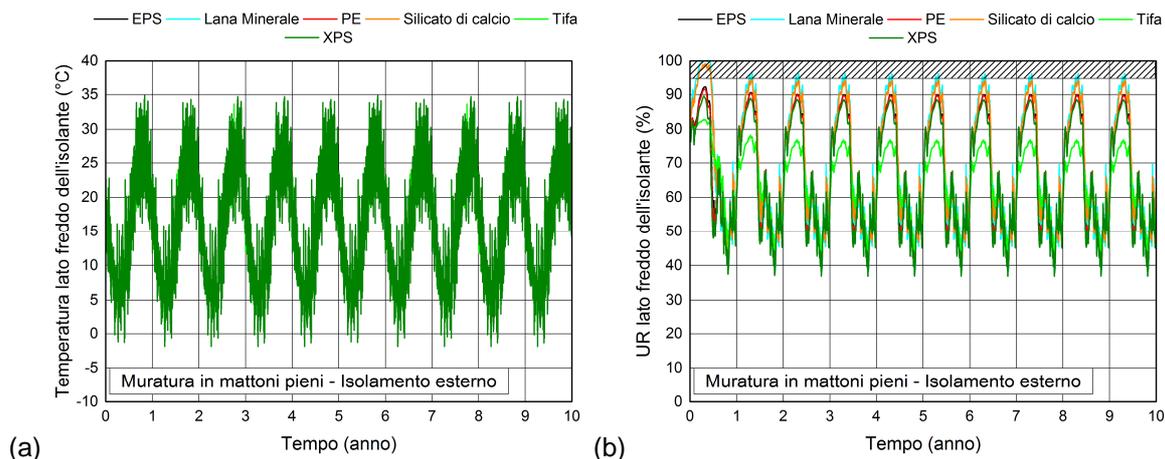


Figura 3.26 – Andamento di temperatura (a) e UR (b) in funzione del tempo, sul lato freddo dell'isolante della parete in mattoni pieni con isolamento esterno nella zona E2.

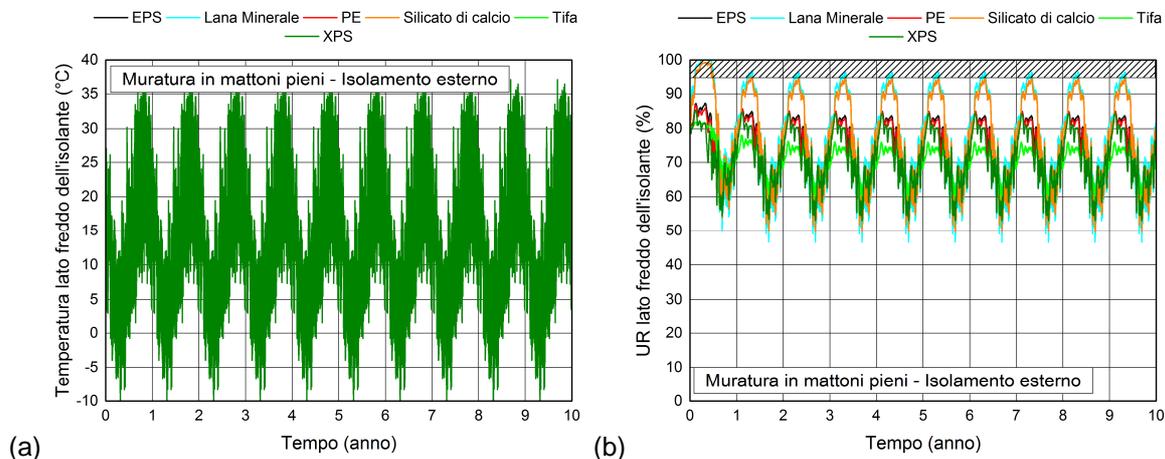


Figura 3.27 – Andamento di temperatura (a) e UR (b) in funzione del tempo, sul lato freddo dell'isolante della parete in mattoni pieni con isolamento esterno nella zona F.

3.2.3.4 Temperatura e umidità relativa sul lato caldo dell'isolante

La Figura 3.28 mostra la situazione igrotermica in corrispondenza del lato caldo dell'isolante per la chiusura in mattoni pieni in zona C1: a sinistra è visibile il grafico della temperatura (Figura 3.28a), a destra quello dell'umidità relativa (Figura 3.28b). La zona campita di grigio tra 80 % e 100 % UR indica l'intervallo igrometrico in corrispondenza del quale potrebbe formarsi muffa, a patto che le temperature siano superiori a 13 °C.

Osservando da principio la temperatura, si nota un andamento costante fin dal primo anno, con oscillazioni stagionali smorzate rispetto a quelle viste sul lato freddo dell'isolante: le minime sono pari a 16 °C, le massime a 27 °C. Non si notano differenze legate al tipo di isolante usato.

Per quanto attiene all'umidità relativa, si riconosce la solita fase di transitorio corrispondente al primo anno di simulazione, dopo la quale si ha un lieve ma costante decremento dell'umidità in tutte le varianti della soluzione tecnica considerata. I valori massimi di umidità, pari a 82 % UR, sono raggiunti dagli isolanti sintetici, XPS in particolare (curva verde scuro), e tifa durante la stagione fredda. Lana minerale e silicato di calcio, invece, mostrano valori più contenuti dell'umidità relativa massima e pari 78 % UR, peraltro nella stagione estiva.

Le soluzioni tecniche isolate con tifa, EPS, PE e XPS superano il limite critico di 80 % UR e le temperature sono sempre superiori a 13 °C, tuttavia tali condizioni devono persistere per un numero sufficiente di giorni (in genera almeno due settimane consecutive) perché vi sia effettiva crescita di muffa; questo nell'eventualità che vi siano spore disponibili sulla superficie interessata. Pertanto si è operato un controllo di ogni variante con WUFI® Bio. A seguito di tali verifiche, nessuna delle soluzioni esaminate presenta effettivi rischi di formazione muffa nella zona climatica C1.

Estendendo l'analisi alle altre aree climatiche si sono riscontrate le medesime condizioni nelle zone C2, D2 e D3 (cfr. Appendice, Figura A.67, Figura A.71 e Figura A.73). Anche in questo caso, la verifica delle chiusure con EPS, XPS, PE e tifa ha sempre dato esito positivo con WUFI® Bio. Nelle zone D1, E ed F l'umidità relativa si mantiene sempre, per ogni materiale, sotto la soglia critica di 80 % UR (cfr. Appendice, Figura A.69, Figura A.75, Figura A.77 e Figura A.79).

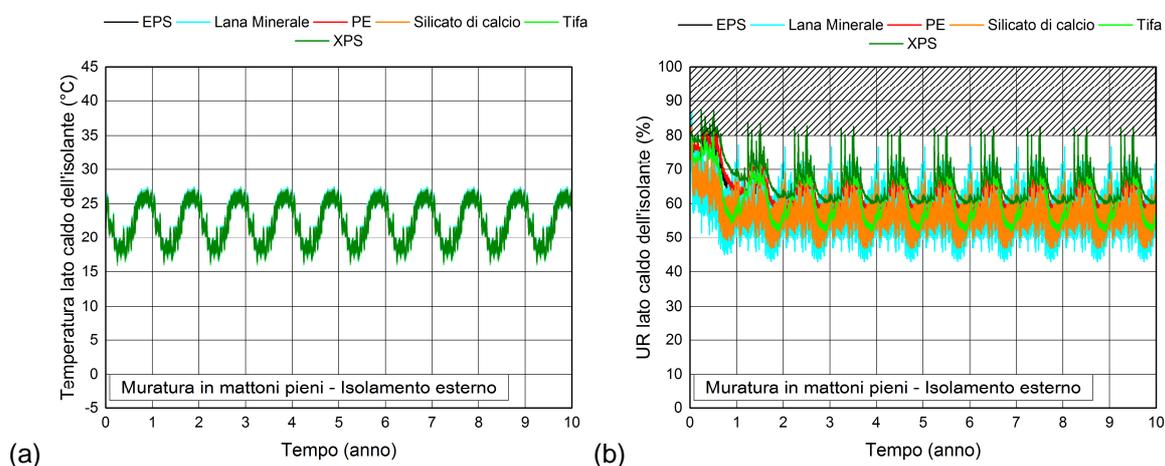


Figura 3.28 – Andamento di temperatura (a) e UR (b) in funzione del tempo, sul lato caldo dell'isolante nella parete in mattoni pieni con isolamento esterno nella zona C1.

3.2.3.5 Temperatura e umidità relativa sulla superficie interna

Anche per la superficie interna si prendono in esame le condizioni igrotermiche della chiusura in mattoni pieni in zona C1, visibili in Figura 3.29, per verificare l'assenza di rischio muffa. Ugualmente a quanto visto nel paragrafo precedente, nel grafico destro relativo all'umidità, si distingue la consueta campitura grigia compresa tra 80 % e 100 % UR, che individua la zona critica per la crescita microbiologica.

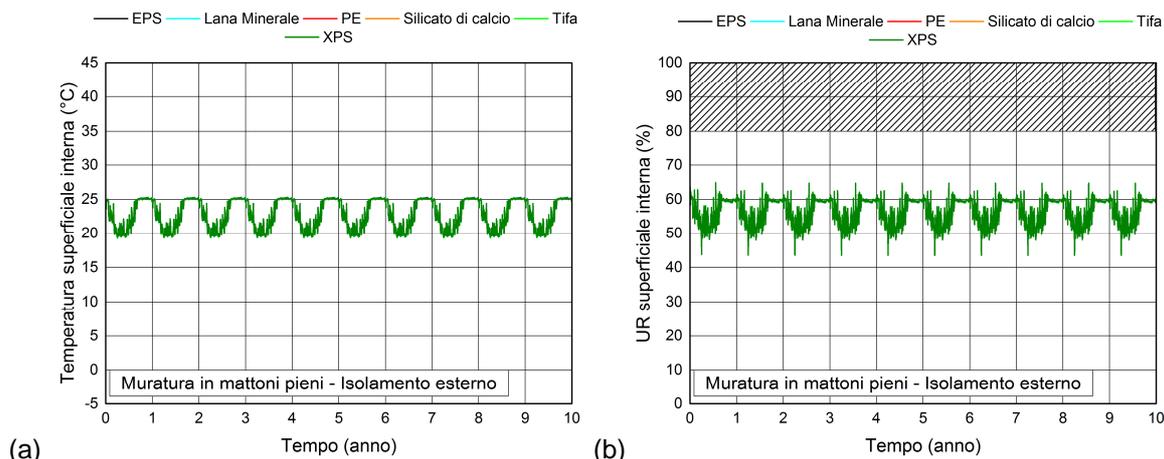


Figura 3.29 – Andamento di temperatura (a) e UR (b) in funzione del tempo, sulla superficie interna della parete in mattoni pieni con isolamento esterno nella zona C1.

Sia temperatura (Figura 3.29a), che umidità relativa (Figura 3.29b), mostrano andamento annuale costante fin dal primo anno simulato. La temperatura oscilla tra 20 °C in inverno e 25 °C in estate, senza differenze tra le varianti considerate. L'umidità relativa oscilla tra 45 % e 65 % UR, anch'essa senza differenze dovute al tipo di isolante usato. La soglia critica di 80 % non viene mai superata, dunque non vi è rischio di formazione muffa.

La situazione rimane invariata, e dunque priva di problemi, passando dalla zona C1 alle altre aree climatiche (cfr. Appendice, Figura A.67, Figura A.69, Figura A.71, Figura A.73, Figura A.75, Figura A.77 e Figura A.79).

3.2.3.6 Condensa interstiziale

A corredo delle verifiche effettuate, si è compiuta anche un'analisi del rischio condensa per la soluzione tecnica considerata. In primo luogo si è controllato che nessuno strato della stessa raggiungesse il 100 % UR, ovvero la saturazione: come visto nei paragrafi precedenti, in nessun caso tale condizione viene raggiunta, per nessuna variante. In seguito si è verificato che la temperatura rilevata non scendesse mai sotto la temperatura di rugiada. A questo proposito, a titolo di esempio, in Figura 3.22 è visibile il confronto tra temperatura rilevata e temperatura di rugiada sul lato freddo dell'isolante per la soluzione tecnica isolata con tifa in zona C1. Come si può notare le due curve non si intersecano mai. Una situazione analoga si ha anche nelle altre varianti studiate, nelle soluzioni di continuità dei vari strati.

Poiché dunque entrambe le verifiche citate hanno dato esito positivo, si può escludere il rischio di condensa interstiziale.

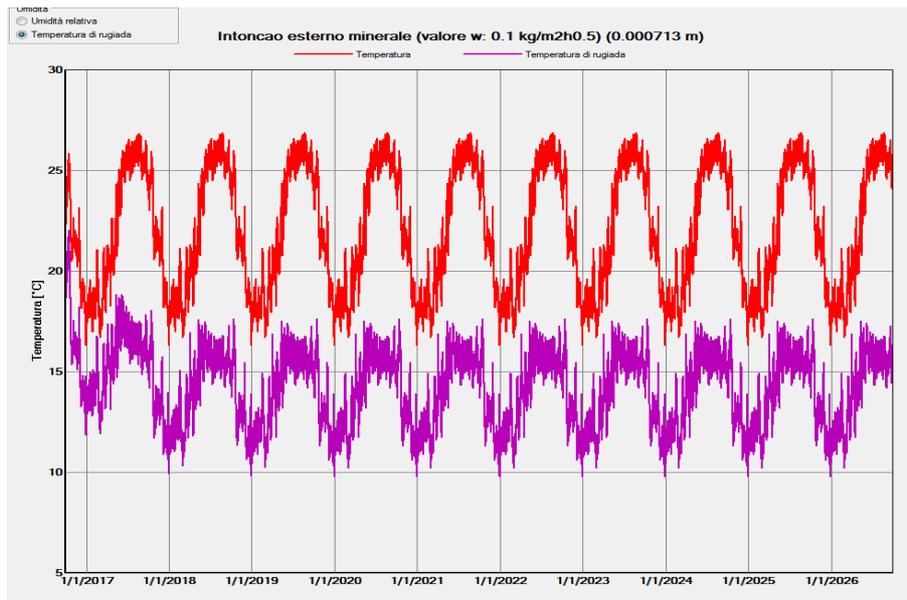


Figura 3.30 – Confronto tra temperatura e temperatura di rugiada sul lato freddo dell'isolante (tifa) della parete in mattoni pieni con isolamento esterno in zona C1.

3.2.3.7 Flusso termico e perdite di calore

L'ultima analisi effettuata per questa soluzione tecnica riguarda il flusso termico (Figura 3.31) e le perdite di calore (Figura 3.32). Ciò permette di confrontare le prestazioni energetiche dei diversi tipi di materiale che isolano la parete.

In Figura 3.31 si può osservare come il flusso di calore attraverso la parete interna della chiusura abbia valori annui costanti, fin dal primo anno simulato, con oscillazioni stagionali comprese tra -11 W/m^2 e 3 W/m^2 per tutte le varianti considerate. Si fa notare come a valori negativi corrispondano flussi termici uscenti dalla parete, mentre a valori positivi siano legati flussi termici entranti nella parete.

Per poter meglio esaminare eventuali differenze tra isolanti diversi, la Figura 3.32 mostra il diagramma a barre delle perdite di calore, espresse in Wh/m^2 , per ogni isolante considerato. Viene fatta un'ulteriore distinzione tra primo anno della simulazione (campitura piena), per tenere conto degli effetti delle condizioni iniziali, e ultimo anno simulato (campitura tratteggiata), dove ormai si è raggiunto l'equilibrio dinamico con l'ambiente circostante. A questo proposito è interessante notare una diminuzione delle perdite di calore, in tutte le varianti considerate, pari a circa il 5 %, probabilmente dovuta al minore contenuto d'acqua totale nella soluzione tecnica. Per contro, non si notano differenze di rilievo tra un tipo d'isolante e l'altro: le varianti con materiale sintetico hanno perdite di calore leggermente più ridotte rispetto agli altri, ma comunque confrontabili. Si può pertanto affermare che, in zona C1, tutte le varianti hanno prestazioni termiche equivalenti, con perdite pari a $7000\text{-}6500 \text{ Wh/m}^2$. Considerazioni del tutto analoghe si possono fare anche per le altre zone climatiche.

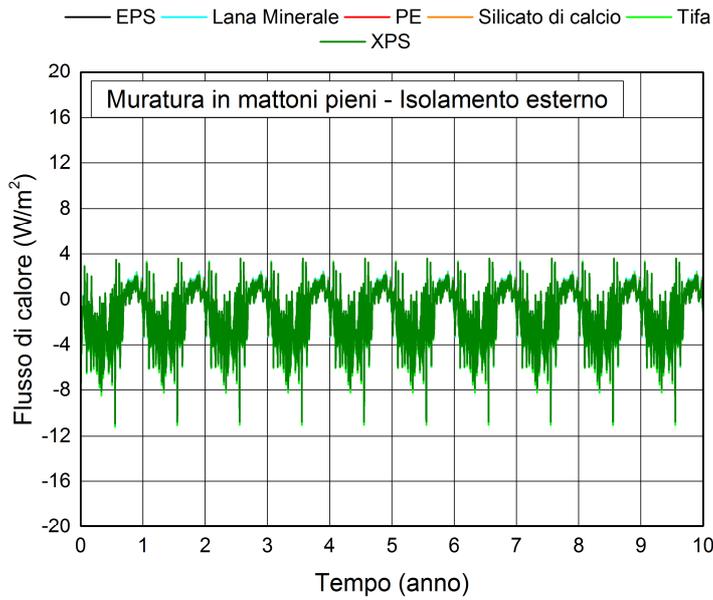


Figura 3.31 – Andamento del flusso termico in funzione del tempo, della parete in mattoni pieni con isolamento esterno nella zona C1.

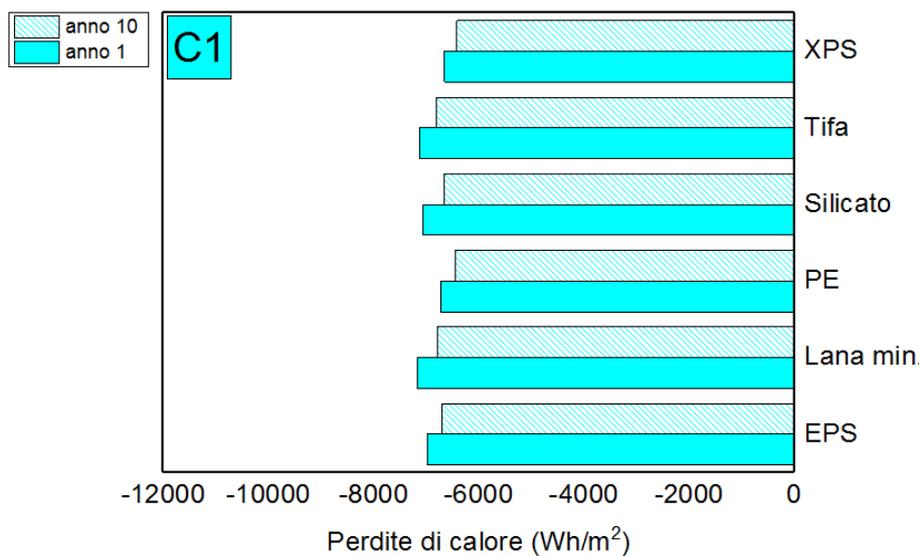


Figura 3.32 – Perdite di calore della parete in mattoni pieni con isolamento esterno nella zona C1.

3.2.4 Analisi di soluzioni tecniche con isolamento interno

Nel seguito si procede all'analisi della chiusura in mattoni pieni isolata dall'interno in zona C1. Le stesse considerazioni del § 3.2.3 si applicano anche in questo caso.

3.2.4.1 Contenuto totale d'acqua

La Figura 3.33 mostra l'andamento del contenuto d'acqua totale nell'intera chiusura in mattoni pieni, isolata dall'interno senza trattamento idrorepellente (intonaco esterno con A pari a $2 \text{ kg/m}^2\text{h}^{0.5}$). Per l'isolamento interno sono state considerate nove varianti, corrispondenti ai nove isolanti usati: EPS (in nero), PE (in rosso) e XPS (in verde scuro) come coibenti sintetici; lana minerale con e senza barriera al vapore (rispettivamente in blu e in azzurro) e silicato di calcio (in arancione) come isolanti di origine minerale; tifa (in verde chiaro), fibra di legno (in grigio) e sughero (in giallo), infine, come materiali vegetali. In questo caso, a differenza di quanto visto con l'isolamento esterno (cfr. Figura 3.22), non si riconosce alcuna fase di transitorio legato alle condizioni iniziali. Ciò è dovuto probabilmente al fatto che queste sono state fissate secondo la procedura spiegata in § 2.4, ovvero effettuando una simulazione preliminare decennale. L'andamento del contenuto d'acqua si mantiene costante in tutte le varianti considerate, tranne nel caso della lana minerale con barriera al vapore (curva blu): qui esso continua lentamente a salire, di modo tale che potrebbe rappresentare un problema sul lungo periodo. Tuttavia, ripetendo la simulazione con condizioni iniziali più elevate (80 %), si è osservato un andamento leggermente decrescente, di modo tale che la variante possa essere comunque accettata, anche se con riserva. I valori rilevati nella chiusura, per tutte le varianti, hanno oscillazioni stagionali molto pronunciate, comprese tra 11.5 kg/m^2 in inverno e 3 kg/m^2 nel periodo estivo. Tra una variante e l'altra si distinguono variazioni minime (a parte il succitato caso della lana minerale con barriera al vapore): gli isolanti sintetici, essendo a celle chiuse, portano a un contenuto d'acqua totale nella parete maggiore rispetto agli altri.

Passando alla zona C2 (Figura 3.34), probabilmente a causa della maggiore piovosità di questo clima, si ha un deciso aumento del contenuto d'acqua. Nelle varianti con isolanti a celle chiuse e con lana minerale dotata di barriera a vapore, dunque nei casi in cui più ridotto è il potenziale di asciugamento dell'intera chiusura, si assiste a un incremento del contenuto d'acqua durante tutto il periodo simulato, senza mai giungere all'equilibrio con l'ambiente circostante. Qui si hanno picchi massimi compresi tra 28.5 kg/m^2 per la lana minerale con barriera al vapore e 25 kg/m^2 per XPS, EPS e PE; i picchi minimi sono rispettivamente a 18 kg/m^2 e 13.5 kg/m^2 . Negli altri casi, ovvero con gli isolanti fibrosi e a celle aperte, si ha un incremento del contenuto d'acqua nei primi 3-4 anni, una volta superati i quali esso rimane annualmente costante, con massimi di 21 kg/m^2 e minimi di 8 kg/m^2 .

Anche qui si è cercato di verificare se, con condizioni iniziali di umidità maggiorate (90 % UR), le varianti con lana minerale e barriera al vapore, XPS, EPS e PE possano raggiungere o meno l'equilibrio. Come risultato di tale calcolo, tutte le varianti mostrano un contenuto d'acqua ancora crescente e vanno dunque bocciate.

Focalizzando l'analisi sulle altre zone climatiche, ogni variante mostra andamento annualmente costante, con picchi massimi di 10-11 kg/m² (cfr. Appendice, Figura A.68, Figura A.70, Figura A.72, Figura A.74 e Figura A.76): Solo in zona F (cfr. Appendice, Figura A.79) si ha una fase di transitorio, con contenuto d'acqua crescente che si stabilizza, dopo 3-4 anni, su valori massimi di 12 kg/m².

A conclusione di questa prima analisi si può affermare che, nel caso di isolamento interno senza intonaco esterno idrorepellente, le varianti con lana minerale, sughero, fibra di legno, tifa e silicato di calcio sono prive di problemi in ogni zona climatica considerata. La soluzione tecnica con lana minerale e barriera al vapore va accettata con riserva nella zona C1 e respinta in C2 per via del contenuto d'acqua crescente. Le varianti con isolanti sintetici (XPS, EPS e PE) non funzionano in zona C2, per via del contenuto d'acqua crescente.

Se si considera invece la presenza di un intonaco idrorepellente sulla superficie esterna della chiusura (con A pari a 0.1 kg/m²h^{0.5}), tale cioè da garantire un'adeguata protezione della stessa contro la pioggia, il contenuto d'acqua in zona C1 (Figura 3.35) risulta confrontabile con quello osservato nel caso di isolamento esterno (cfr. Figura 3.22). Esso ha cioè andamento annuale costante, e pari a circa 3 kg/m². Solo la fibra di legno mostra valori medi annui leggermente maggiori ma comunque accettabili e pari a circa 3 kg/m². Tali osservazioni valgono per la zona C1, così come per le altre aree climatiche (cfr. Appendice, Figura A.68, Figura A.70, Figura A.72, Figura A.74, Figura A.76 e Figura A.78). Si può dunque affermare che tutte le varianti, in ogni clima, sono prive di problemi per quanto concerne il contenuto d'acqua totale.

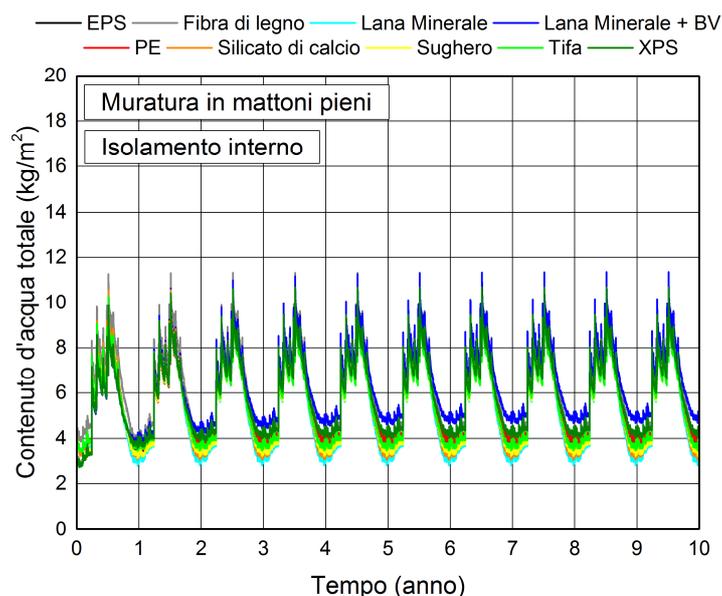


Figura 3.33 – Andamento del contenuto d'acqua totale in funzione del tempo, nella parete in mattoni pieni con isolamento interno senza idrorepellente nella zona C1.

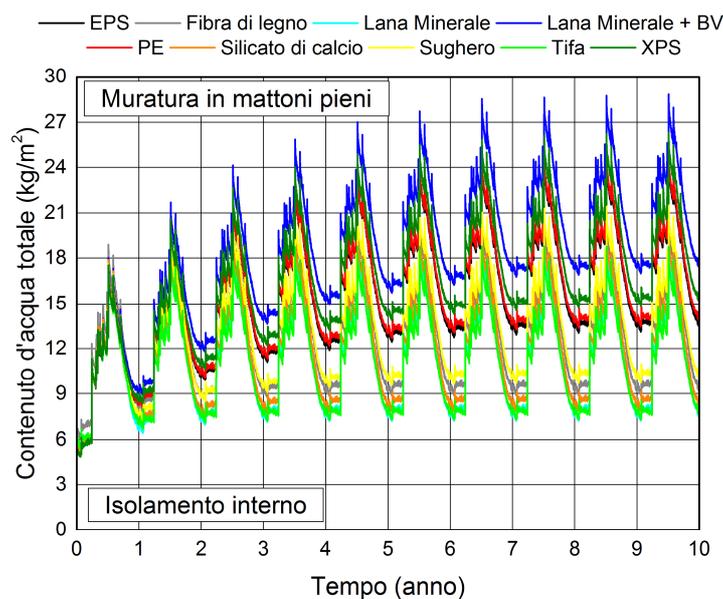


Figura 3.34 – Andamento del contenuto d’acqua totale in funzione del tempo, nella parete in mattoni pieni con isolamento interno senza idrorepellente nella zona C2.

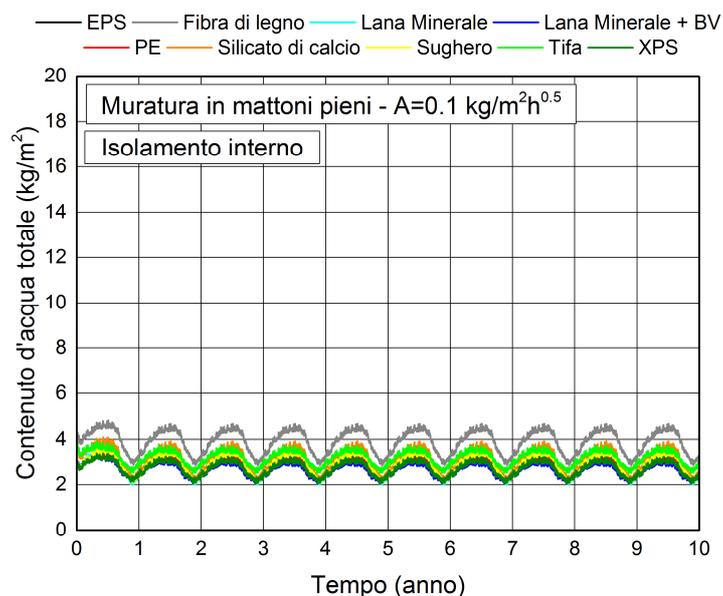


Figura 3.35 – Andamento del contenuto d’acqua totale in funzione del tempo, nella parete in mattoni pieni con isolamento interno con idrorepellente nella zona C1.

3.2.4.2 Contenuto di umidità nello strato isolante

Il contenuto d’acqua nello strato isolante della chiusura in zona C1 è visibile in Figura 3.36. Qui si nota immediatamente come il contenuto d’acqua rimanga costante fin dal primo anno in tutte le varianti tranne che in quella con lana minerale e barriera al vapore (valori medi annui pari a 3-4 kg/m³): la presenza della membrana, infatti, blocca il flusso di umidità proveniente dall’esterno facendo accumulare molta acqua proprio in corrispondenza del coibente. Rimangono pertanto le riserve sul buon funzionamento di questa variante nel clima della zona C1. Nel caso di altri materiali si hanno valori annui costanti, pari circa a 12 kg/m³ per la fibra di legno, 6 kg/m³ per la

tifa, 2 kg/m^3 per il silicato di calcio e poco meno di 1 kg/m^3 per tutti gli altri materiali. Tali valori non sono problematici per gli isolanti considerati, in termini di aumento della conducibilità termica (dell'ordine di 10^{-4} W/mK). Per la fibra di legno tuttavia, che presenta il contenuto d'acqua maggiore rispetto a tutti gli altri, si è verificato che non vi fossero problemi di marcescenza: questi insorgono a partire da 18 M.% (cfr. Tabella 1.4), ma a un contenuto d'acqua massimo di 13.5 kg/m^3 corrisponde appena l'8.5 M.%. Anche questa situazione può pertanto dirsi accettabile e priva di problemi.

Nel caso di C2 si ha un'ulteriore conferma di quanto visto nel paragrafo precedente a proposito della lana minerale con barriera al vapore: qui il contenuto d'acqua cresce sensibilmente durante tutto il periodo simulato, e a nulla giova modificare le condizioni iniziali per cercare di intercettare il momento in cui verrà raggiunto l'equilibrio. Si passa così da picchi di circa 4 kg/m^3 a 17 kg/m^3 nel giro di 10 anni. Si ha pertanto una conferma del fatto che questa particolare variante vada respinta nel clima C2. Per quanto riguarda invece gli isolanti a celle chiuse, quali XPS, EPS e PE, il contenuto d'acqua cresce impercettibilmente e si mantiene su valori molto bassi (picchi massimi di 2 kg/m^3); inoltre, simulazioni ripetute con umidità iniziale maggiorata al 90 % hanno mostrato il raggiungimento dell'equilibrio nello strato isolante dopo circa 7 anni di calcolo. Pertanto tali varianti possono essere accettate. Per quanto attiene agli altri tipi d'isolante, essi mantengono valori annui costanti e di poco maggiori ($1\text{-}2 \text{ kg/m}^3$) a quelli visti in C1.

Analizzando il contenuto d'acqua dello strato isolante in altre zone climatiche, si osserva un andamento analogo a quello visto in C1 per tutte le varianti (cfr. Appendice, Figura A.68, Figura A.70, Figura A.72, Figura A.74, Figura A.76 e Figura A.78). Anche in questi casi la lana minerale con barriera al vapore ha un contenuto d'acqua lievemente crescente ma ulteriori simulazioni con umidità iniziale maggiorata hanno mostrato il raggiungimento delle condizioni di equilibrio dopo 7-8 anni.

Si ritiene pertanto che, in assenza d'intonaco idrorepellente, solo la variante con lana minerale e barriera al vapore in zona C2 sia critica. Negli altri casi si ha sempre il raggiungimento delle condizioni di equilibrio (anche se in alcuni casi dopo 7-8 anni) e livelli di umidità innocui.

In Figura 3.38 si può osservare l'andamento del contenuto d'acqua nello strato isolante, in presenza di intonaco idrorepellente sulla superficie esterna della facciata. Tali andamenti sono annualmente costanti durante tutto il periodo simulato e con valori leggermente più ridotti rispetto a quelli visti nel caso di facciata priva di protezione contro la pioggia (cfr. Figura 3.36). Tutte le varianti possono dunque dirsi prive di problemi in zona C1. Ripetendo la stessa verifica per le restanti zone climatiche si giunge alle stesse conclusioni (cfr. Appendice, Figura A.68, Figura A.70, Figura A.72, Figura A.74, Figura A.76 e Figura A.78).

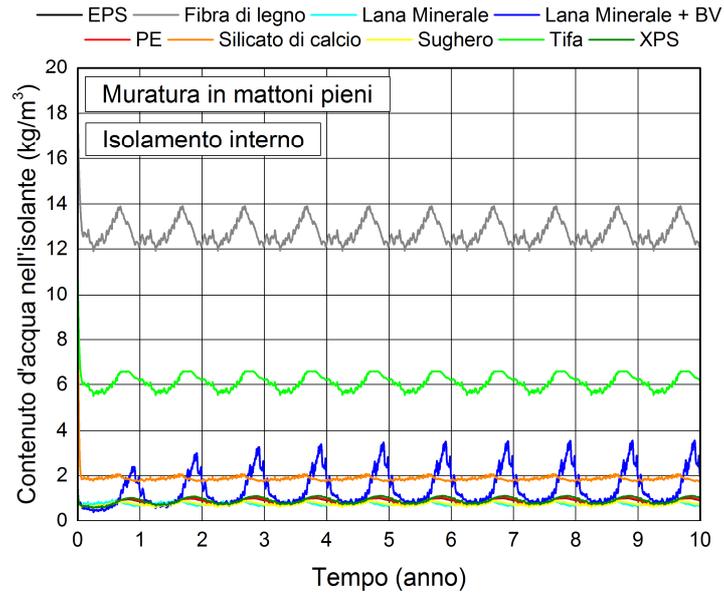


Figura 3.36 – Andamento del contenuto d'acqua nell'isolante in funzione del tempo, nella parete in mattoni pieni con isolamento interno senza idrorepellente nella zona C1.

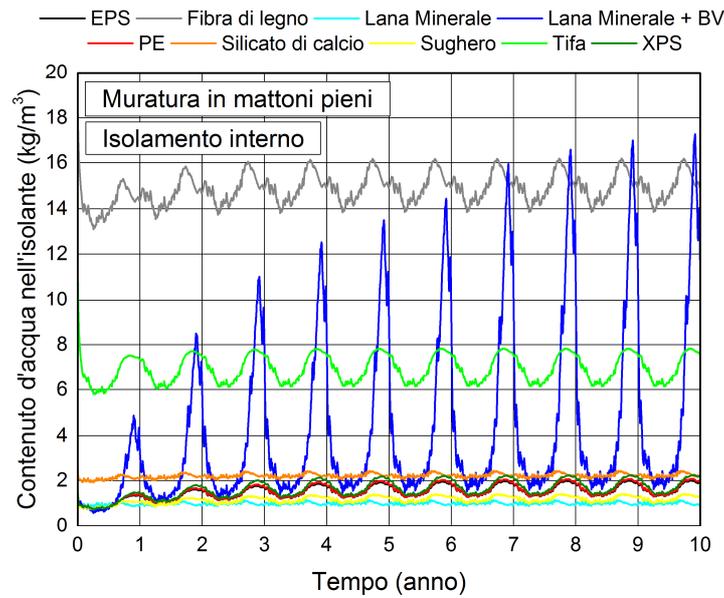


Figura 3.37 – Andamento del contenuto d'acqua nell'isolante in funzione del tempo, nella parete in mattoni pieni con isolamento interno senza idrorepellente nella zona C2.

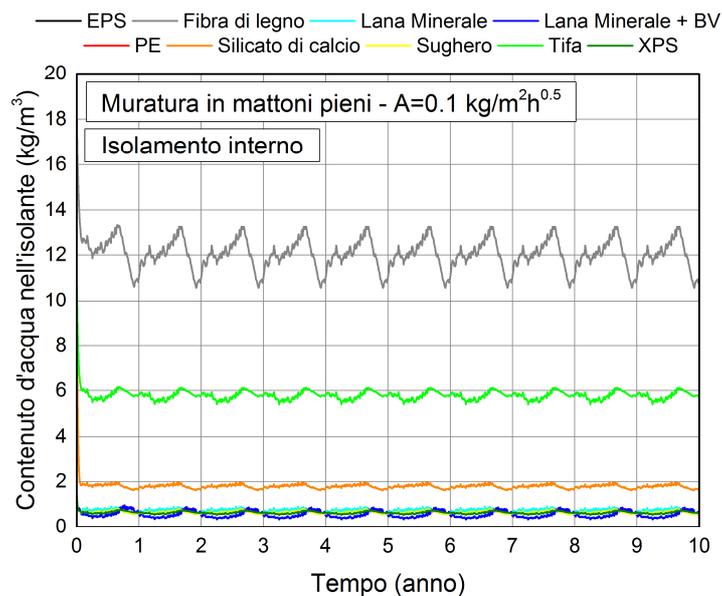


Figura 3.38 – Andamento del contenuto d’acqua nell’isolante in funzione del tempo, nella parete in mattoni pieni con isolamento interno con idrorepellente nella zona C1.

3.2.4.3 Temperatura e umidità relativa sul lato freddo dell’isolante

La Figura 3.39 mostra l’andamento di temperatura (a) e umidità relativa (b) sul lato freddo dell’isolante interno. La campitura grigia tra 95 % e 100 % UR mostra la zona in cui potrebbe formarsi ghiaccio, a patto che le temperature siano inferiori a 0 °C.

Il diagramma delle temperature mostra andamento annuale costante fin dal primo anno simulato, con oscillazioni stagionali comprese tra 8 °C e 30 °C per tutte le varianti. In nessun caso si raggiunge la temperatura di congelamento dell’acqua.

L’umidità relativa, per contro, mostra andamenti piuttosto variegati in funzione del materiale isolante considerato. Nel caso di tifa, lana minerale, silicato di calcio e sughero, UR presenta un andamento annualmente costante fin dal primo anno di simulazione e oscillazioni stagionali comprese tra 55 % e 78 %. Nel caso degli isolanti a celle chiuse e della lana minerale in combinazione con barriera al vapore, invece, si registra un aumento lieve ma costante dell’umidità relativa, che arriva a picchi massimi pari a 85 % UR con la lana minerale e barriera al vapore, 78 % UR negli altri casi. Ripetendo le simulazioni con umidità iniziale maggiorata, tuttavia, tale lieve incremento sparisce, e l’umidità relativa decresce leggermente fino a stabilizzarsi su un valore di 86 % UR dopo 6-7 anni.

Pertanto, tutte le varianti della chiusura isolata dall'interno senza idrorepellente, in zona C1, si devono ritenere prive di problemi legati all'attacco del gelo, anche a lungo termine. Infatti, non è previsto che superino la soglia critica posta a 95 % UR. Inoltre, le temperature in questo punto della chiusura si mantengono ben al di sopra del limite di 0 °C. Tali considerazioni possono essere estese alle zone D ed E (cfr. Appendice, Figura A.68, Figura A.70, Figura A.72, Figura A.74 e Figura A.76).

Nella zona C2 (Figura 3.40), malgrado l'umidità relativa di lana minerale con barriera al vapore, XPS, EPS e PE cresca fino a superare il limite del 95 % UR, non si riscontrano problemi di gelo in virtù delle temperature, i cui valori minimi si mantengono di circa 5 °C al di sopra della soglia di congelamento dell'acqua.

Nella zona F, che è quella col clima più rigido, si hanno invece temperature minime inferiori a 0 °C e picchi concomitanti di umidità pari a circa 95-96 % UR nella variante con lana minerale, come illustrato in Figura 3.41. Tale variante va pertanto considerata soggetta all'attacco del gelo e va dunque bocciata.

Nel caso di applicazione d'intonaco idrorepellente, invece, la protezione che questo offre alla chiusura contro l'assorbimento dell'acqua piovana fa sì che il livello di umidità relativa negli isolanti sintetici si abbassi notevolmente (di circa il 10 % UR), mentre rimane pressoché invariato negli altri casi (la temperatura rimane comunque invariata). Ciò si può notare confrontando la Figura 3.39b (zona C1 senza idrorepellente) con la Figura 3.42, che mostra l'andamento dell'umidità relativa, in presenza di intonaco idrorepellente, nella zona C1 (Figura 3.42a) e nella zona F (Figura 3.42b). Si noti inoltre che, malgrado la protezione dalla pioggia, la variante in zona F con lana minerale sia comunque soggetta ad attacco del gelo (picchi di 96 % UR). Questa variante è, peraltro, l'unica a non funzionare, anche con idrorepellente (cfr. Appendice, Figura A.68, Figura A.70, Figura A.72, Figura A.74 e Figura A.76).

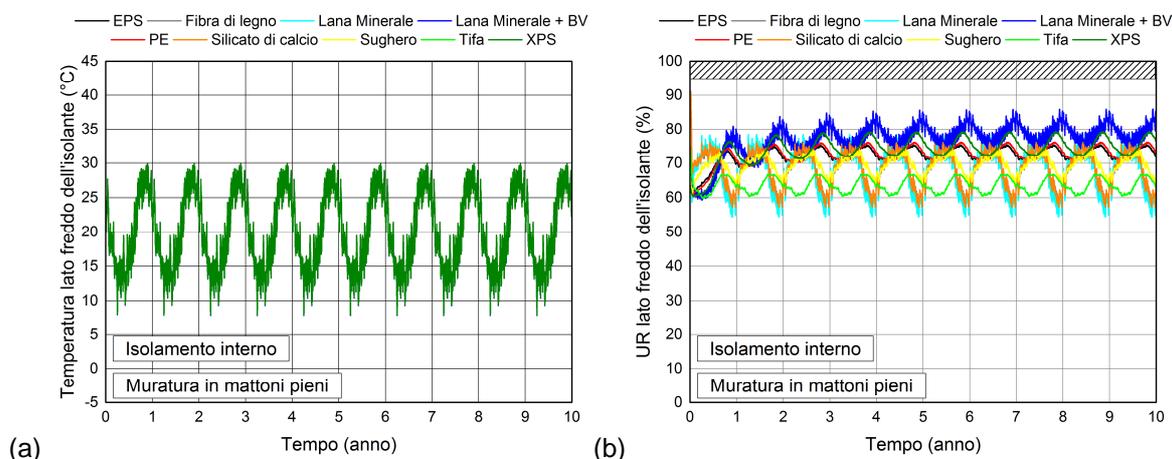


Figura 3.39 – Andamento di temperatura (a) e UR (b) in funzione del tempo, sul lato freddo dell'isolante della parete in mattoni pieni con isolamento interno senza idrorepellente nella zona C1.

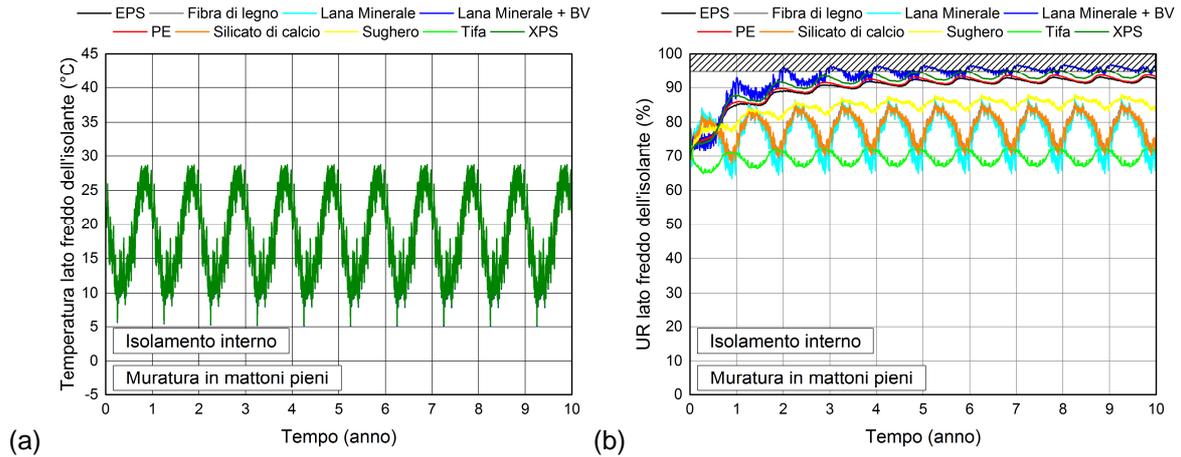


Figura 3.40 – Andamento di temperatura (a) e UR (b) in funzione del tempo, sul lato freddo dell'isolante della parete in mattoni pieni con isolamento interno senza idrorepellente nella zona C2.

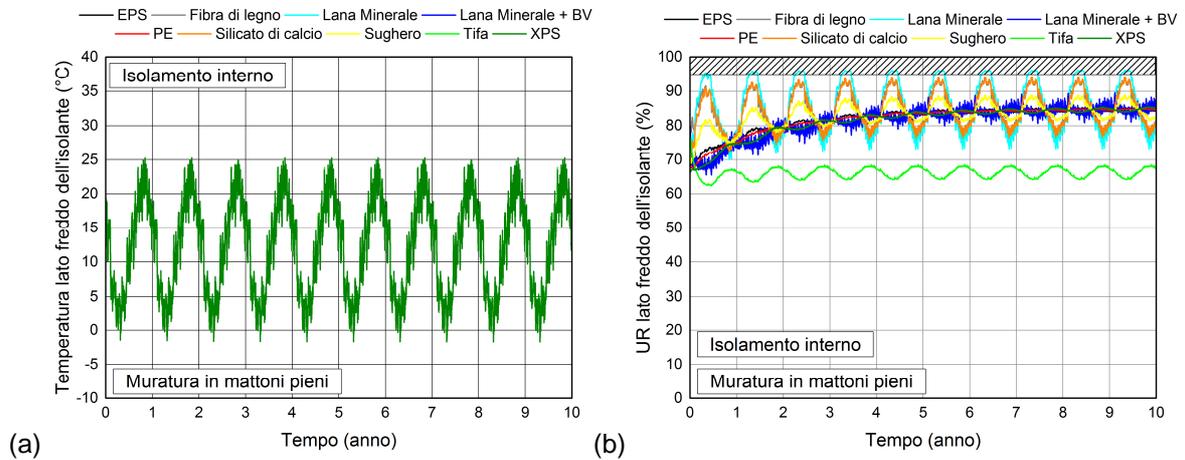


Figura 3.41 – Andamento di temperatura (a) e UR (b) in funzione del tempo, sul lato freddo dell'isolante della parete in mattoni pieni con isolamento interno senza idrorepellente nella zona F.

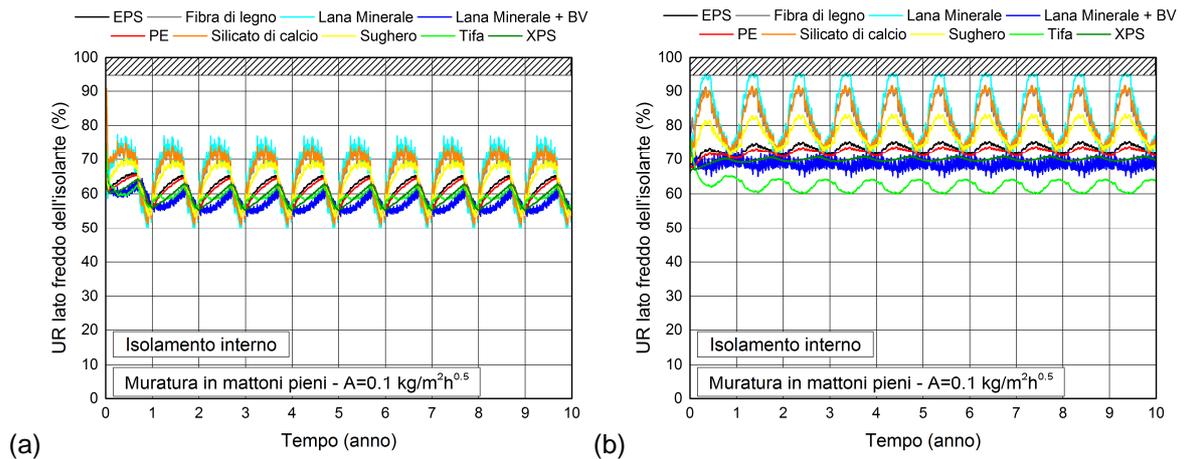


Figura 3.42 – Andamento di UR nel tempo sul lato freddo dell'isolante della parete in mattoni pieni con isolamento interno con idrorepellente a confronto nella zona C1 (a) ed F (b).

3.2.4.4 Temperatura e umidità relativa sulla superficie interna

La Figura 3.43 mostra le condizioni di temperatura (a) e umidità relativa (b) in corrispondenza della superficie interna per la chiusura in mattoni pieni in zona C1, priva di intonaco idrorepellente. La zona campita di grigio tra 80 % e 100 % UR indica l'intervallo igrometrico in corrispondenza del quale potrebbe formarsi muffa, a patto che le temperature siano superiori a 13 °C.

La temperatura (Figura 3.43a) presenta andamento costante durante tutto il periodo simulato, con oscillazioni stagionali comprese tra 20 °C e 25 °C. Ogni variante ha lo stesso comportamento termico.

Per quanto concerne l'umidità relativa (Figura 3.43b), anch'essa ha andamento costante nel tempo, con oscillazioni stagionali comprese tra 40 % e 60 % UR, a prescindere dal tipo di isolante usato.

Le stesse considerazioni si possono estendere a tutte le zone climatiche prese in esame, a prescindere dal tipo di variante, con e senza intonaco idrorepellente (cfr. Appendice, Figura A.66, Figura A.68, Figura A.70, Figura A.72, Figura A.74, Figura A.76 e Figura A.78).

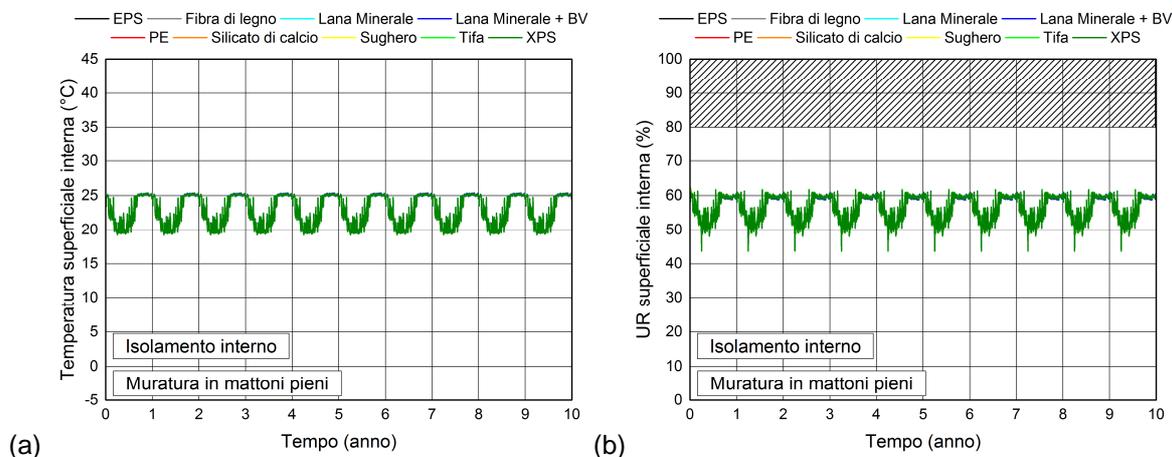


Figura 3.43 – Andamento di temperatura (a) e UR (b) in funzione del tempo, sulla superficie interna della parete in mattoni pieni con isolamento interno senza idrorepellente nella zona C1.

3.2.4.5 Condensa interstiziale

A corredo delle verifiche effettuate, si è compiuta anche in questo caso un'analisi del rischio condensa. Oltre al controllo del mancato raggiungimento della saturazione per ogni materiale, si è verificato che la temperatura rilevata non scendesse mai sotto la temperatura di rugiada. A titolo di esempio, in Figura 3.44 è visibile il confronto tra temperatura rilevata e temperatura di rugiada sul lato freddo dell'isolante per la soluzione tecnica isolata con tifa in zona C1. Come si può notare le due curve non si intersecano mai. Una situazione analoga si ha anche nelle altre varianti studiate,

nelle soluzioni di continuità dei vari strati. Poiché dunque entrambe le verifiche citate hanno dato esito positivo, si può escludere il rischio di condensa interstiziale.

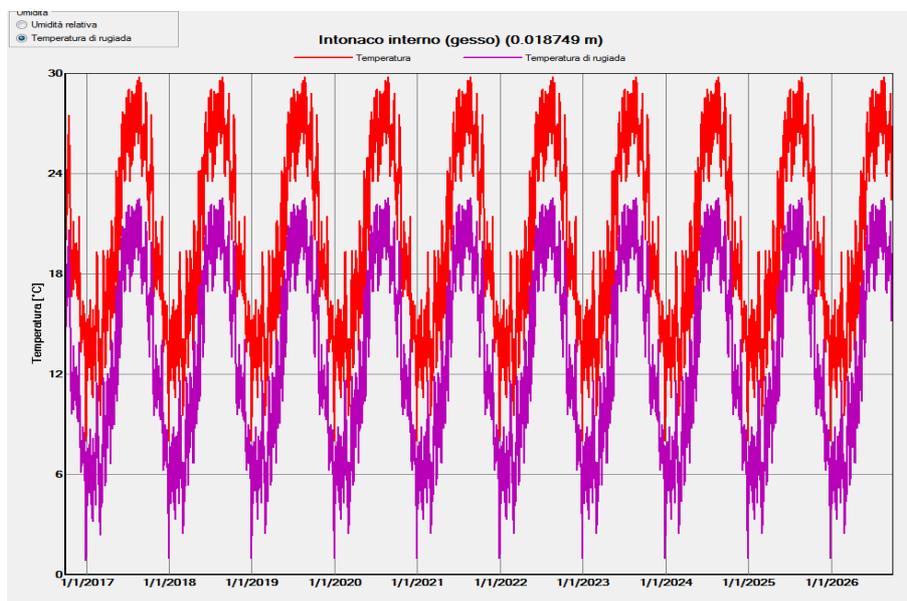


Figura 3.44 – Confronto tra temperatura e temperatura di rugiada sul lato freddo dell'isolante (tifa) della parete in mattoni pieni con isolamento interno senza idrorepellente in zona C1.

3.2.4.6 Flusso termico e perdite di calore

In Figura 3.45 si può osservare il flusso di calore attraverso la parete interna della chiusura abbia valori annui costanti, fin dal primo anno simulato, con oscillazioni stagionali comprese tra -6 W/m^2 e 3 W/m^2 per tutte le varianti considerate. Si fa notare come a valori negativi corrispondano flussi termici uscenti dalla parete, mentre a valori positivi siano legati flussi termici entranti nella parete.

Per le perdite di calore, la Figura 3.46 mostra la situazione nella zona C1, senza intonaco idrorepellente, distinguendo anche qui tra primo anno della simulazione (campitura piena), per tenere conto degli effetti delle condizioni iniziali, e ultimo anno simulato (campitura tratteggiata), dove ormai si è raggiunto l'equilibrio dinamico col l'ambiente circostante. I valori delle perdite di calore ammontano a circa 6500 Wh/m^2 , senza grosse differenze tra una variante e l'altra. Tra primo e ultimo anno si notano piccole riduzioni delle perdite termiche, quantificabili in circa il 5 % del totale. La presenza dell'intonaco idrorepellente incide poco sul quantitativo totale delle perdite di calore. Considerazioni simili si possono fare anche per le soluzioni tecniche esposte alle altre zone climatiche.

Fa eccezione la zona C2, in cui le differenze tra primo e ultimo anno di simulazione sono pressoché nulle, nel caso di assenza di protezione dalla pioggia (Figura 3.47). In alcune varianti, quelle con XPS, EPS, PE e lana minerale con barriera al vapore, le perdite di calore aumentano addirittura col passare del tempo. Ciò deriva probabilmente dal gran quantitativo di acqua piovana che si accumula nella chiusura

senza poter ri-evaporare all'esterno. Infatti, il fenomeno torna a invertirsi (perdite più ridotte nell'ultimo anno di simulazione) se si applica un intonaco con idrorepellente sulla superficie esterna della chiusura. Si passa così dai valori massimi iniziali di circa 9000 Wh/m² a circa 8000 Wh/m² (Figura 3.48).

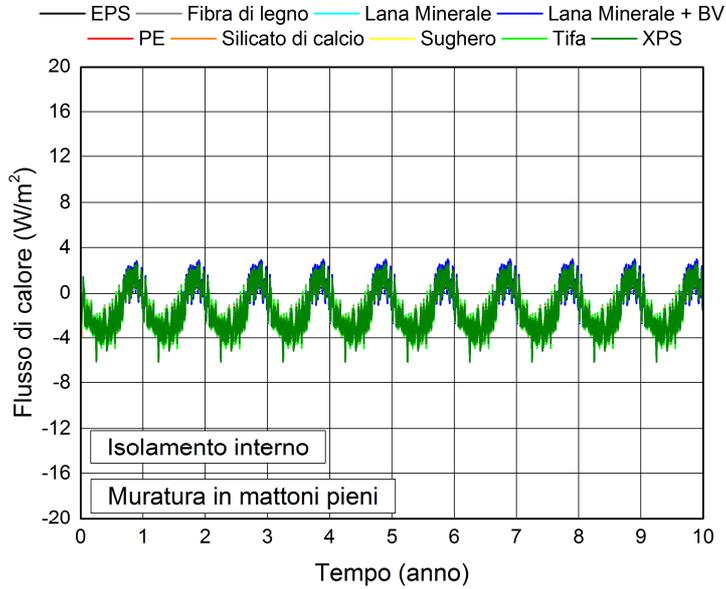


Figura 3.45 – Andamento del flusso termico in funzione del tempo, della parete in mattoni pieni con isolamento interno con idrorepellente nella zona C1.

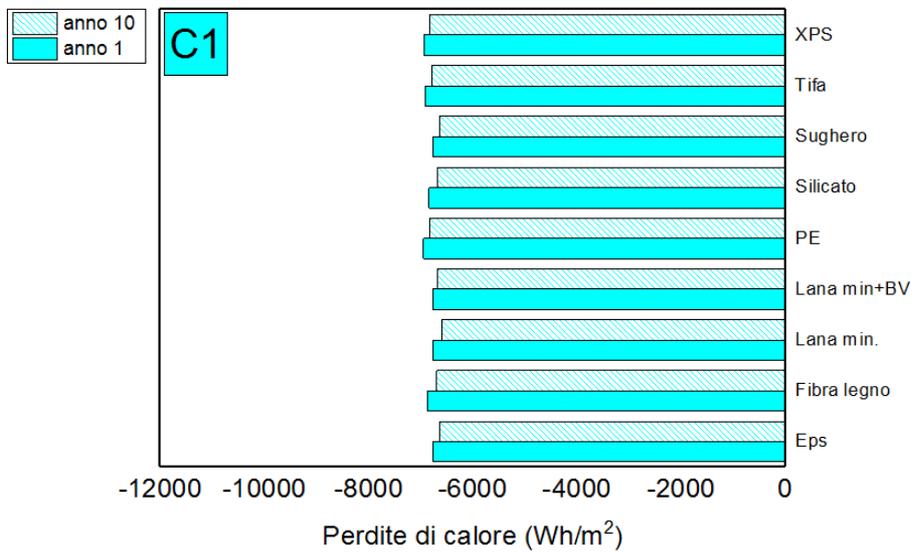


Figura 3.46 – Perdite di calore della parete in mattoni pieni con isolamento interno senza idrorepellente nella zona C1.

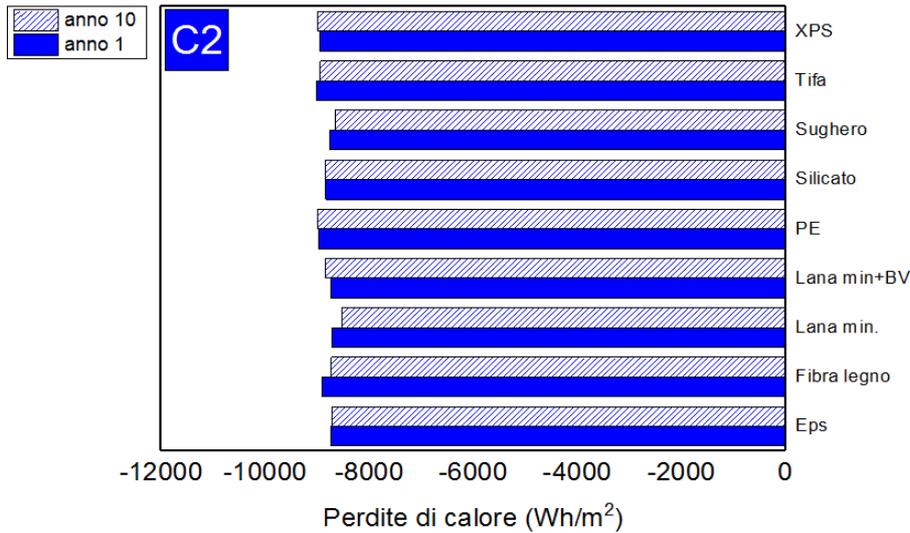


Figura 3.47 – Perdite di calore della parete in mattoni pieni con isolamento interno senza idrorepellente nella zona C2.

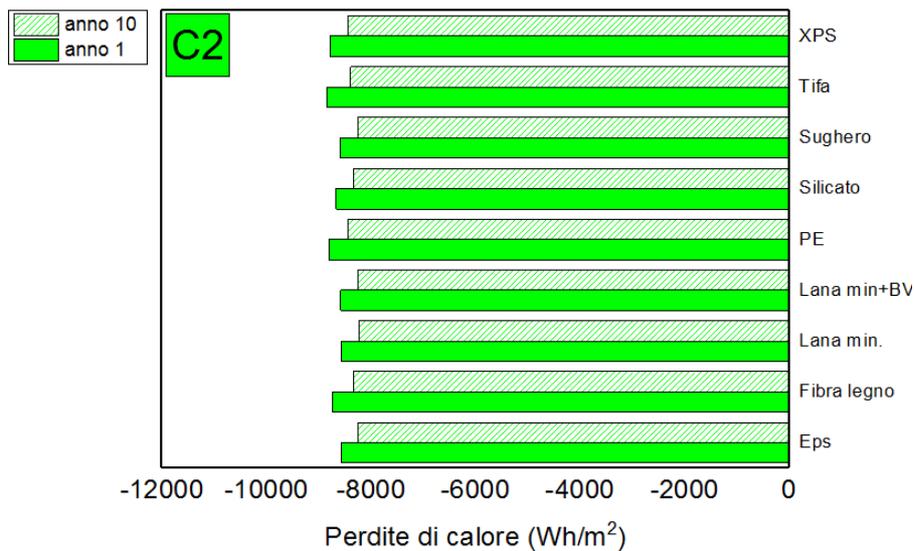


Figura 3.48 – Perdite di calore della parete in mattoni pieni con isolamento interno con idrorepellente nella zona C2.

3.2.5 Riepilogo dei risultati

Con la stessa logica utilizzata nel caso del mattone pieno, sono state analizzate tutte le soluzioni tecniche in ogni zona climatica. Per brevità si è deciso di ometterne i risultati dettagliati, per i quali si rimanda all'Appendice, preferendo presentare una sintesi dei dati più significativi nei paragrafi che seguono e la sinossi di abella 3.3 al termine del capitolo cfr. § 3.2.5.8).

3.2.5.1 Muratura in arenaria

Isolamento esterno

Per la muratura in pietra arenaria con isolamento a cappotto si sono considerati solo tre tipi di materiale isolante: lana minerale, silicato di calcio e tifa.

Il contenuto d'acqua totale e nell'isolante decresce leggermente o si mantiene costante durante tutto il periodo di simulazione. A titolo di esempio, in Figura 3.49 si riportano per la zona C1 (ma andamento analogo si ha anche nelle altre zone climatiche) il contenuto d'acqua totale e nell'isolante. I valori del contenuto d'acqua qui registrati non sono problematici in termini di aumento della conducibilità termica (quantificabile nell'ordine di 10^{-4} W/mK).

Nelle zone C e D una prima analisi ha fatto pensare a possibili problemi di muffa sul lato caldo dell'isolante, nelle varianti con tifa e talvolta silicato di calcio e lana minerale (questi ultimi solo in zona D1), visto il saltuario superamento del limite di 80 % UR (cfr. Figura 3.50a, esempio per la zona C1); tuttavia, ulteriori indagini compiute con l'ausilio di WUFI® Bio hanno mostrato l'assenza di attacco microbiologico.

Riguardo al gelo, i livelli di umidità sul lato freddo dell'isolante si mantengono, persino in zona F, al di sotto del limite di 95 % UR (cfr. Figura 3.50b).

Si può pertanto affermare che tutte le varianti analizzate, a prescindere dalla zona climatica di esposizione, non presentano problemi di alcun genere (cfr. Appendice, Figura A.39, Figura A.41, Figura A.43, Figura A.45, Figura A.47, Figura A.49, Figura A.51 e Figura A.53).

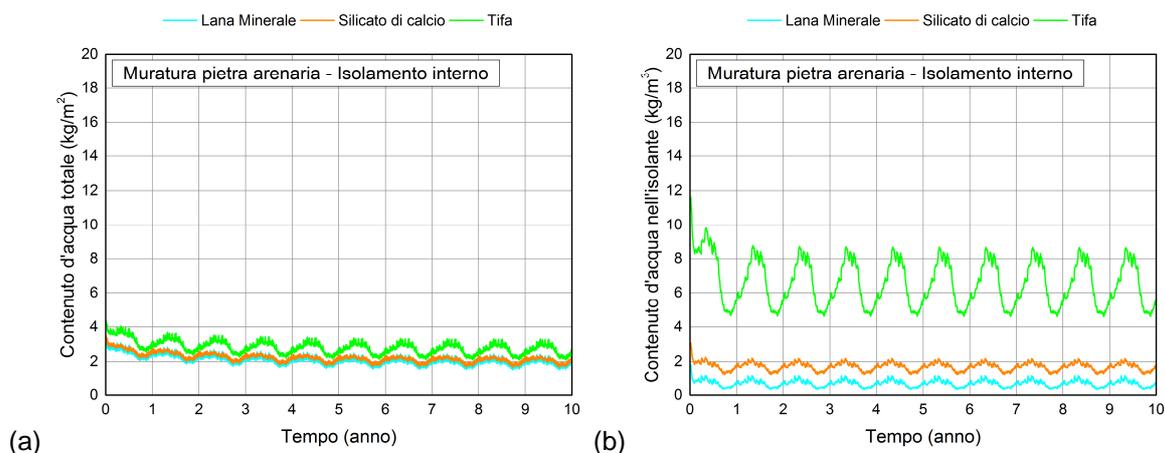


Figura 3.49 – Andamento del contenuto d'acqua totale (a) e nell'isolante (b) in funzione del tempo, nella parete in arenaria con isolamento esterno nella zona C1.

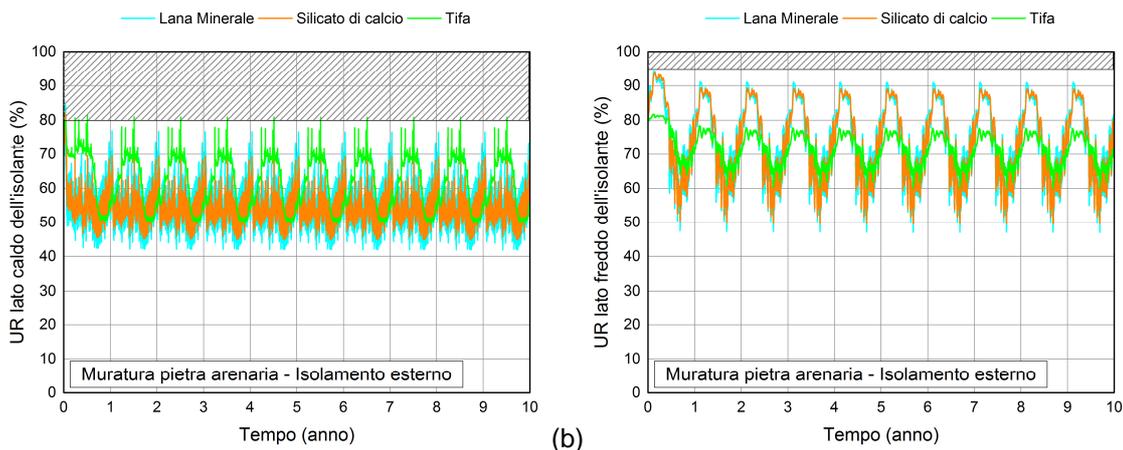


Figura 3.50 – Andamento di UR in funzione del tempo sul lato caldo dell'isolante in zona C1 (a) e sul lato freddo dell'isolante in zona F (b), nella parete in arenaria con isolamento esterno.

Isolamento interno

Per l'isolamento dall'interno si sono analizzate sei varianti: fibra di legno, lana minerale con e senza barriera al vapore, silicato di calcio, sughero e tifa. Ogni variante è stata presa in esame con e senza la presenza di un intonaco esterno idrorepellente, per la protezione della parete contro la pioggia.

Le verifiche igrotermiche compiute su dette soluzioni tecniche hanno mostrato l'assenza di problemi legati a un accumulo eccessivo di umidità, anche in assenza d'intonaco idrorepellente. Infatti, il contenuto d'acqua totale e nello strato isolante si mantengono costanti e su valori modesti durante tutto il periodo simulato (in Figura 3.51 è visibile un esempio senza intonaco idrorepellente per la zona C1), tali da non dar luogo a un aumento del valore di trasmittanza termica della parete. Inoltre, nel caso della fibra di legno, si è controllato che il contenuto d'acqua non superasse la soglia critica per la marcescenza dei materiali a base lignea, posta a 18 M.% (cfr. Tabella 1.4). Si è visto così come anche questa situazione fosse priva di problemi, poiché il contenuto d'acqua in questo isolante non supera i valori di 12-16 kg/m³, che corrispondono a 10.5-11 M.% (conversione eseguita in base alla funzione di assorbimento igroscopico per la fibra di legno).

Si è esclusa la presenza di problemi legati alla crescita microbologica in ogni zona climatica e variante studiata, in quanto l'umidità relativa sulla superficie interna, sia con che senza intonaco esterno idrorepellente, si mantiene tutto l'anno su valori compresi tra 40 % e 60 % (cfr. Figura 3.52a, esempio per la zona F senza idrorepellente), dove la soglia di criticità è posta a 80 % UR.

Gli unici problemi si registrano in relazione all'attacco del gelo, ma solamente nella zona F, che è quella col clima più rigido (Bellunese). Si veda a questo proposito la Figura 3.52b: essa mostra come le varianti con lana minerale (senza barriera al vapore), silicato di calcio e fibra di legno raggiungano umidità relative sul lato freddo dell'isolante superiori al limite critico di 95 % UR. Tale situazione si manifesta a prescindere dalla presenza dell'intonaco idrorepellente esterno. Una spiegazione di tale fenomeno può risiedere nel fatto che questo particolare tipo di pietra arenaria non garantisce il trasporto liquido.

In conclusione, anche la parete in pietra arenaria con isolamento interno non presenta problemi igrotermici, a prescindere dal tipo d'isolante usato e zona climatica di esposizione. Fa eccezione la zona F, dove per le varianti con lana minerale, silicato di calcio e fibra di legno si ha attacco del gelo, anche in presenza di idrorepellente (cfr. Appendice, Figura A.38, Figura A.40, Figura A.42, Figura A.44, Figura A.46, Figura A.48, Figura A.50 e Figura A.52).

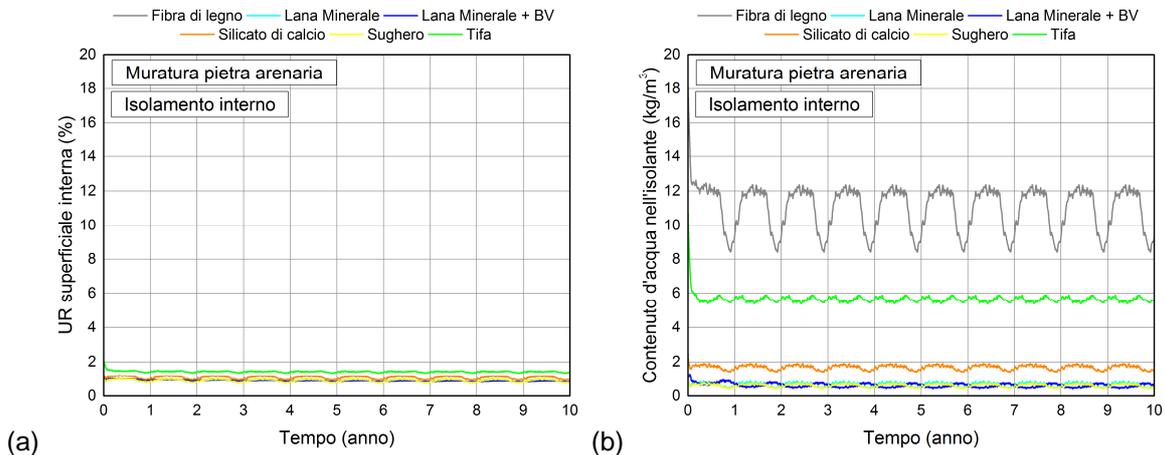


Figura 3.51 – Andamento del contenuto d'acqua totale (a) e nell'isolante (b) in funzione del tempo, nella parete in arenaria con isolamento interno senza idrorepellente nella zona C1.

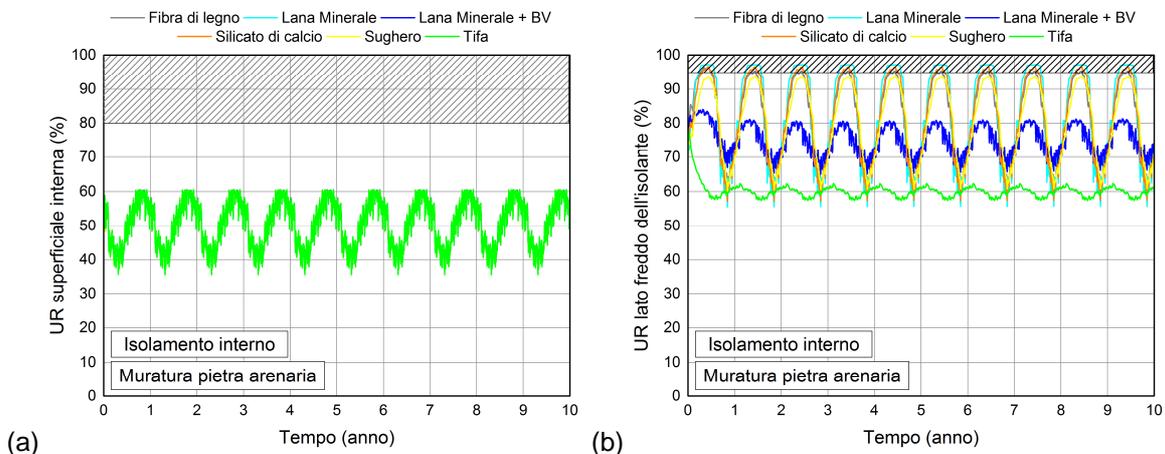


Figura 3.52 – Andamento di UR in funzione del tempo (a) sulla superficie interna e (b) sul lato freddo dell'isolante, nella parete in arenaria con isolamento interno senza idrorepellente nella zona F.

3.2.5.2 Muratura in tufo

Isolamento esterno

La muratura con blocchi lapidei di tufo con isolamento esterno è stata presa in esame con tre diversi tipi di isolante: lana minerale, silicato di calcio e tifa. Data la sua diffusione esclusivamente nell'Italia centro-meridionale, tali soluzioni tecniche sono state valutate solo nelle zone C e D, escludendo le aree E ed F che interessano esclusivamente il Nord Italia.

In relazione al contenuto d'acqua totale, esso decresce durante la fase di transitorio di circa un anno per mantenersi poi costante su valori annui costanti pari a circa 36 kg/m^2 in ogni zona climatica considerata (in Figura 3.53a è visibile un esempio per la zona C1). Malgrado tali valori siano molto superiori a quelli osservati in altri tipi di parete, si ritiene che essi siano non problematici per il tufo, dal momento che si tratta di un materiale fortemente poroso e igroscopico. A supporto di tale teoria, se si prende in esame il contenuto d'acqua nello strato isolante, si vede come esso si mantenga, per ogni variante e zona climatica, su livelli costanti, bassi e confrontabili con quelli rilevati su altri tipi di chiusura (in Figura 3.53b è visibile un esempio per la zona C1). Anche in questo caso si può dunque affermare che tali valori del contenuto d'acqua non siano problematici in termini di aumento della conducibilità termica.

Come nel caso della muratura in pietra arenaria, anche qui, nelle zone C1-C2 e D2-D3, una prima analisi ha fatto pensare a possibili problemi di muffa sul lato caldo dell'isolante, nelle varianti con tifa e saltuariamente con lana minerale e silicato di calcio (rispettivamente in zona C1 e C2). Tuttavia, malgrado in tali casi vi sia un superamento del limite di 80 % UR (in Figura 3.54a è visibile un esempio per la zona C1), il controllo eseguito con WUFI® Bio ha mostrato l'assenza di muffa.

Riguardo al gelo, i livelli di umidità sul lato freddo dell'isolante si mantengono al di sotto del limite di 95 % UR (in Figura 3.54b è visibile un esempio per la zona C1). Peraltro le temperature in questo punto della chiusura si mantengono sempre al di sopra di $0 \text{ }^\circ\text{C}$, visto che si sono considerate solo le zone climatiche C e D.

Si può pertanto affermare che tutte le varianti analizzate, a prescindere dalla zona climatica di esposizione, non presentano problemi di alcun genere (cfr. Appendice, Figura A.55, Figura A.57, Figura A.59, Figura A.61 e Figura A.63).

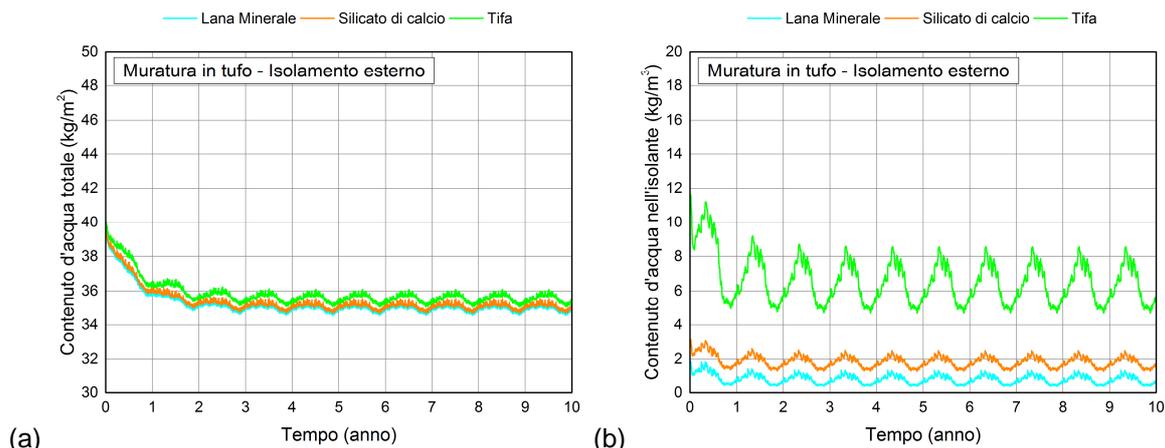


Figura 3.53 – Andamento del contenuto d’acqua totale (a) e nell’isolante (b) in funzione del tempo, nella parete in tufo con isolamento esterno nella zona C1.

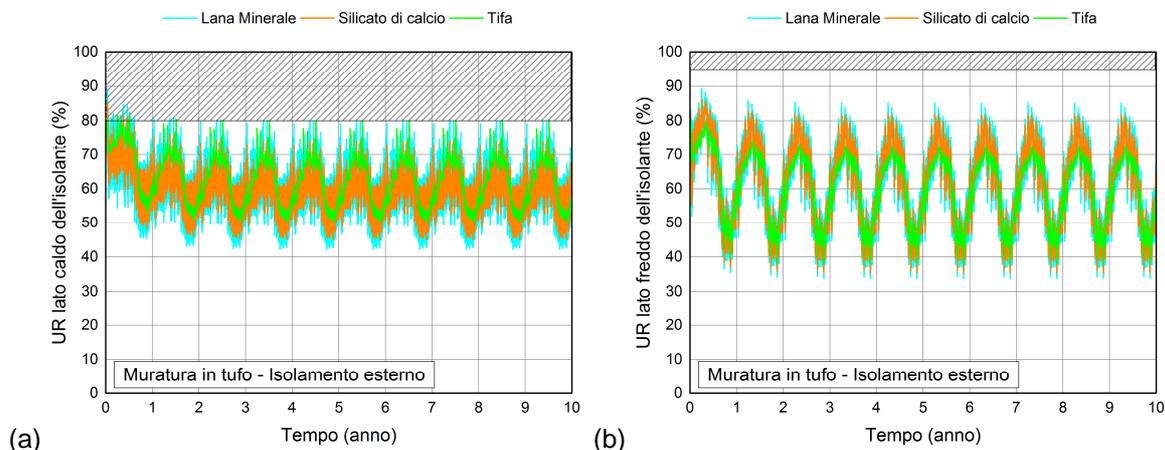


Figura 3.54 – Andamento di UR in funzione del tempo sul lato caldo dell’isolante in zona C1 (a) e sul lato freddo dell’isolante in zona F (b), nella parete in tufo con isolamento esterno.

Isolamento interno

Anche per l’isolamento dall’interno della muratura in tufo si sono prese in esame sei varianti: fibra di legno, lana minerale con e senza barriera al vapore, silicato di calcio, sughero e tifa. Ogni variante è stata analizzata con e senza la presenza di un intonaco esterno idrorepellente, per la protezione della parete contro la pioggia. Come detto nel paragrafo precedente, questo tipo di parete è stata simulata solo nelle zone climatiche C e D.

Il controllo delle soluzioni tecniche senza idrorepellente ha evidenziato dei problemi nelle varianti con lana minerale provvista di barriera al vapore, in ogni clima considerato tranne nella zona D1, che è molto secca: il contenuto d’acqua totale e nell’isolante cresce nel tempo, rendendo difficile stabilire quando e in corrispondenza di quali valori si raggiunga l’equilibrio. Per cercare di rispondere a questo interrogativo le simulazioni sono state ripetute con un contenuto di umidità iniziale maggiorato (80 % UR): così facendo il contenuto d’acqua decresce fino a stabilizzarsi, dopo 9 anni, su valori pari a 46 kg/m². Analizzando il medesimo caso in

presenza di intonaco idrorepellente sulla superficie della chiusura, non si hanno problemi, in quanto il contenuto d'acqua decresce leggermente in ogni variante, per stabilizzarsi dopo 3-4 anni su valori annui costanti e più bassi (circa 34-36 kg/m²) rispetto a quelli visti per il caso senza idrorepellente. I due grafici mostrati in Figura 3.55 forniscono un esempio di quanto detto, per la zona C1. Nelle varianti con altri isolanti il contenuto d'acqua totale rimane costante, a prescindere dalla presenza dello strato idrorepellente.

Le stesse considerazioni si possono fare anche in merito al contenuto d'acqua nello strato isolante: incremento nella lana minerale dotata di barriera al vapore, ma solo nel caso senza idrorepellente, con conseguenti perdite di calore crescenti col passare del tempo, in particolare in zona C1 e C2; valori costanti in tutti gli altri casi, a prescindere dalla presenza dell'intonaco idrorepellente, e tali da non dar luogo a un aumento del valore di trasmittanza termica della parete (cfr. Figura 3.56, esempio per la zona C1). Anche per la fibra di legno, i valori del contenuto d'acqua si mantengono ben al di sotto della soglia critica del 18 M.%.

Non sussistono problemi di muffa, visto che l'umidità relativa sulla superficie interna, sia con che senza intonaco esterno idrorepellente, si mantiene tutto l'anno su valori compresi tra 40 % e 60 % in ogni zona climatica e in ogni variante studiata (in Figura 3.57a è visibile un esempio per la zona C1).

Anche in merito all'attacco del gelo non si riscontrano problemi di sorta, dal momento che le soluzioni tecniche, in tutte le varianti considerate, mostrano valori annui costanti di umidità, con oscillazioni stagionali comprese tra 50 % e 80 % UR, con e senza idrorepellente (si veda in Figura 3.57b un esempio per la zona C1 con idrorepellente).

Si può dunque affermare che la muratura in tufo con isolamento interno non ha problemi igrotermici nelle zone climatiche coinvolte (C e D), tranne nel caso della lana minerale con barriera al vapore, in cui il lento stabilizzarsi del contenuto d'acqua totale e nell'isolante porta a un peggioramento delle caratteristiche termiche della soluzione tecnica, particolarmente visibile nelle zone C. Tali problemi si risolvono con l'applicazione di un intonaco esterno idrorepellente: in questo caso funziona ogni variante in ogni clima studiato. La zona D1, grazie alla scarsa presenza di pioggia, risulta comunque non problematica. Problemi di muffa e gelo sono stati esclusi in ogni variante studiata, a prescindere dal clima di esposizione e dalla presenza o meno di uno strato idrorepellente (cfr. Appendice, Figura A.54, Figura A.56, Figura A.58, Figura A.60 e Figura A.62).

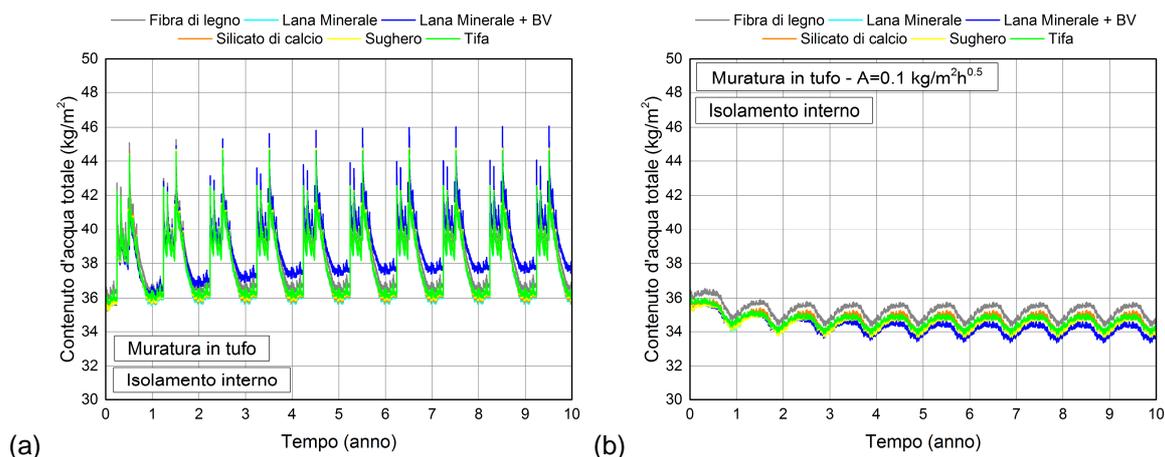


Figura 3.55 – Andamento del contenuto d'acqua totale in funzione del tempo nella variante senza idrorepellente (a) e con idrorepellente (b), della parete in tufo con isolamento interno nella zona C1.

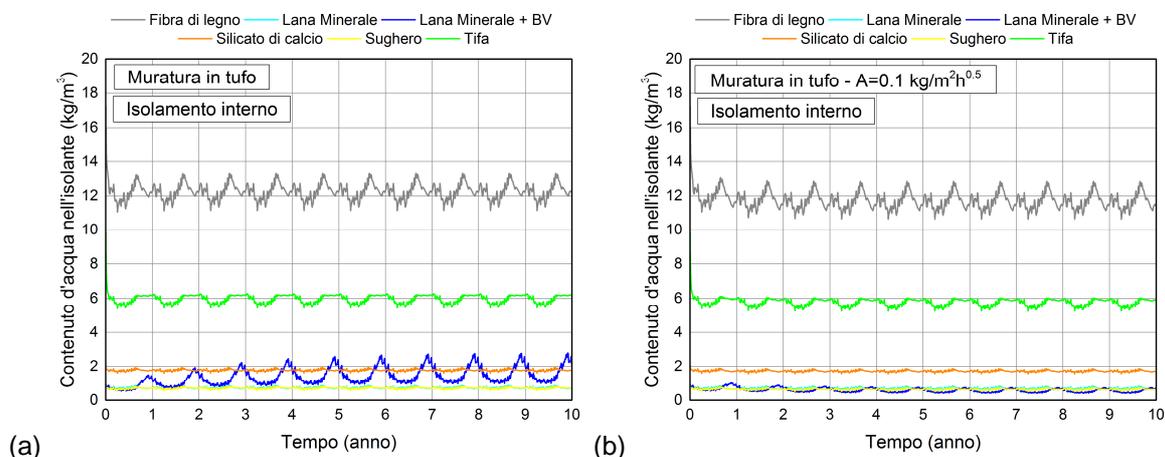


Figura 3.56 – Andamento del contenuto d'acqua nell'isolante nel tempo nella variante senza idrorepellente (a) e con idrorepellente (b), della parete in tufo con isolamento interno nella zona C1.

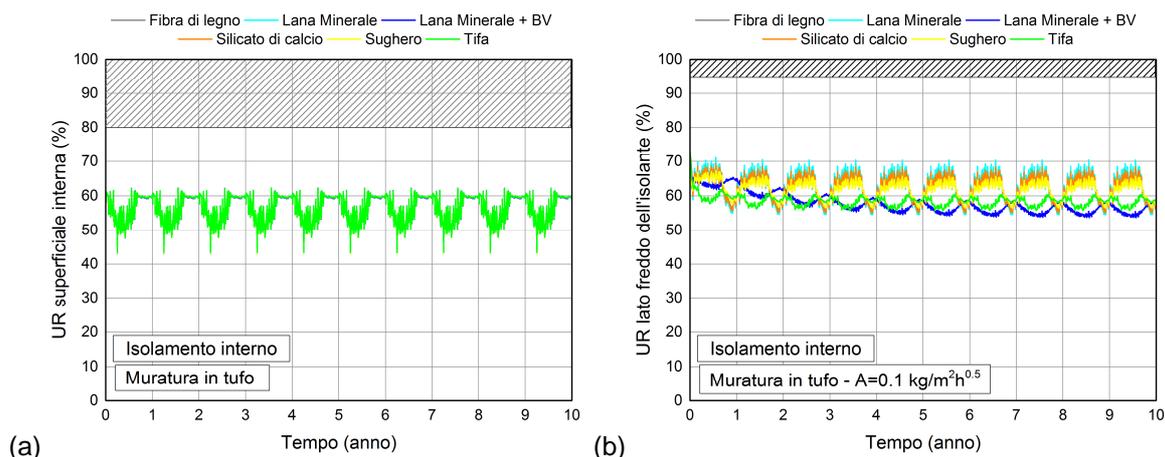


Figura 3.57 – Andamento di UR in funzione del tempo (a) sulla superficie interna e (b) sul lato freddo dell'isolante della parete in tufo con isolamento interno senza idrorepellente (a) e con idrorepellente (b) nella zona C1.

3.2.5.3 Muratura in mattoni pieni

Isolamento esterno

La muratura in mattoni pieni isolata dall'esterno (con EPS, PE, XPS, lana minerale, silicato di calcio e tifa) è stata trattata diffusamente nel § 3.2.3. Qui si riassumono pertanto solo le informazioni principali. Per la visione completa dei grafici si rimanda invece all'Appendice (Figura A.65, Figura A.67, Figura A.69, Figura A.71, Figura A.73, Figura A.75, Figura A.77 e Figura A.79).

Questo tipo di chiusura, in ogni sua variante, non presenta alcun incremento dell'umidità negli otto climi considerati. Di conseguenza non si hanno variazioni nelle prestazioni energetiche della parete. Anche in relazione alla crescita microbologica non si hanno problemi, sia sul lato caldo dell'isolante che sulla superficie interna della chiusura. Riguardo all'attacco del gelo, invece, si rilevano delle criticità nelle zone più fredde E2 ed F, nelle varianti con lana minerale e silicato di calcio, che sono pertanto le uniche da bocciare.

Isolamento interno

Per una trattazione completa della muratura in mattoni pieni con isolamento interno si rimanda al § 3.2.4. Qui segue un compendio delle principali conclusioni, facendo presente che sono state studiate nove varianti: EPS, PE, XPS, lana minerale con e senza barriera al vapore, silicato di calcio, fibra di legno, sughero e tifa. Per la visione completa dei grafici si rimanda anche in questo caso all'Appendice (Figura A.64, Figura A.66, Figura A.68, Figura A.70, Figura A.72, Figura A.74, Figura A.76 e Figura A.78).

Nel caso di isolamento interno senza intonaco esterno idrorepellente, la variante con lana minerale e barriera al vapore va accettata con riserva nella zona C1 e respinta in C2 per via del contenuto d'acqua crescente. Le varianti con isolanti sintetici (XPS, EPS e PE) non funzionano in zona C2, per via del contenuto d'acqua crescente. In presenza di intonaco esterno idrorepellente, invece, tutte le varianti, in ogni clima, sono prive di problemi per quanto concerne il contenuto d'acqua totale.

Non sussistono invece problemi di muffa sulla superficie interna della chiusura in nessuna delle nove varianti analizzate. Il ruolo del clima è qui ininfluenza.

Con riferimento all'attacco del gelo, la variante con lana minerale non risulta verificata in zona F, in presenza e in assenza di intonaco esterno idrorepellente.

3.2.5.4 Muratura in mattoni forati

Isolamento esterno

Per l'isolamento esterno della muratura in mattoni forati sono stati considerati cinque tipologie di materiale isolante: EPS, XPS, PE, lana minerale, silicato di calcio e tifa.

Analogamente a quanto visto nella muratura in mattoni pieni, anche qui il contenuto d'acqua, sia totale che nello strato isolante, decresce leggermente o si mantiene su livelli annui costanti per l'intero periodo di calcolo, senza sensibili differenze dovute al clima: in ognuna delle otto zone simulate, infatti, il comportamento igrometrico della chiusura è del tutto simile a quello mostrato in Figura 3.58 relativamente alla zona C1. Come già osservato in precedenza a proposito della muratura in mattoni pieni, il livello di umidità nei materiali isolanti non è tale da provocare un sensibile aumento della conducibilità termica del coibente.

A proposito del rischio muffa, nelle zone C e D le varianti isolate con EPS, XPS, PE e tifa mostrano un superamento della soglia di umidità critica posta a 80 % UR (cfr. Figura 3.59a per la zona C1). Tuttavia, la verifica condotta con l'ausilio di WUFI® Bio ha evidenziato l'assenza di crescita microbologica sul lato caldo dell'isolante. Sulla superficie interna non sussistono mai i presupposti perché vi sia crescita di muffa.

Con riferimento al rischio gelo, i valori di umidità registrati sul lato freddo dell'isolante si mantengono al di sotto del 95 % UR nelle zone C, D ed E1. Passando invece a climi più freddi, rappresentati dalle zone E2 ed F, si nota un superamento della soglia di umidità critica nella variante con lana minerale (cfr. Figura 3.59b per la zona F).

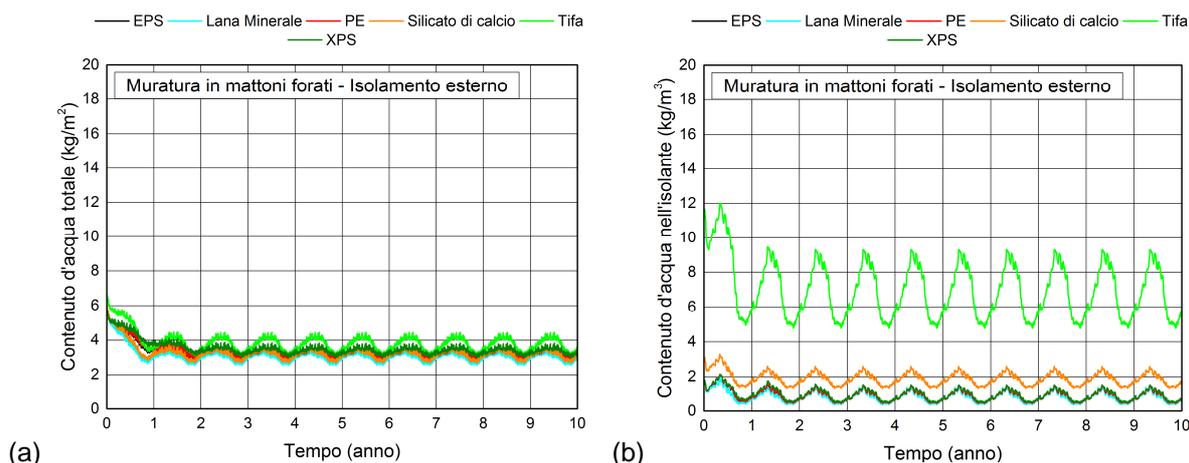


Figura 3.58 – Andamento del contenuto d'acqua totale (a) e nell'isolante (b) in funzione del tempo, nella parete in mattoni forati con isolamento esterno nella zona C1.

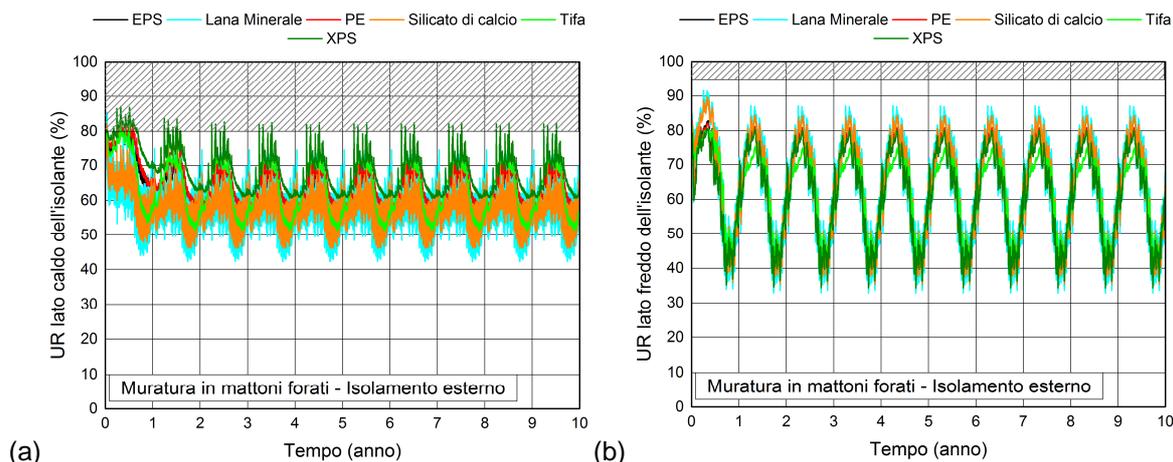


Figura 3.59 – Andamento di UR in funzione del tempo sul lato caldo dell'isolante in zona C1 (a) e sul lato freddo dell'isolante in zona F (b), nella parete in mattoni forati con isolamento esterno.

Alla luce delle verifiche fatte si può asserire che la muratura in mattoni forati con isolamento esterno funziona in ogni clima preso in esame, tranne nelle zone fredde E2 ed F, dove insorgono problemi legati al gelo nella variante con lana minerale (cfr. Appendice, Figura A.81, Figura A.83, Figura A.85, Figura A.87, Figura A.89, Figura A.91, Figura A.93 e Figura A.95).

Isolamento interno

Le varianti prese in esame per l'isolamento interno della muratura in mattoni forati sono nove, e comprendono: EPS, XPS, PE, tifa, lana minerale con e senza barriera al vapore, silicato di calcio, fibra di legno e sughero. Ogni variante è stata analizzata in presenza e in assenza di uno strato d'intonaco esterno con proprietà idrorepellenti.

Il comportamento igrometrico di questa chiusura in assenza di intonaco idrorepellente mostra delle criticità nelle zone C, D2 e D3: qui si riscontra un aumento del contenuto d'acqua totale, cui corrisponde anche un aumento del contenuto d'acqua nello strato isolante, nelle varianti isolate con XPS; EPS, PE e lana minerale con barriera al vapore. Ripetendo le simulazioni con un contenuto di umidità iniziale maggiorato (90 % UR) si osserva un andamento decrescente del contenuto d'acqua, con lento raggiungimento dell'equilibrio dopo circa 9 anni, nelle zone C1, D2 e D3. Nella zona C2, invece, il contenuto d'acqua continua a crescere in tutte le varianti critiche, che pertanto vanno bocciate. Tali problemi si risolvono qualora la parete sia dotata di un'adeguata protezione contro la pioggia, che ne impedisca l'accumulo al suo interno. Ciò è ben visibile nella Figura 3.60, che confronta il contenuto d'acqua totale in assenza (a) e in presenza (b) di intonaco esterno idrorepellente, in zona C2. Considerazioni affini si possono fare anche per il contenuto d'acqua nello strato isolante. La situazione più critica è quella della lana minerale con barriera al vapore, ma solo nel caso senza idrorepellente, con conseguenti perdite di calore crescenti col passare del tempo, in particolare nella zona C2, che è particolarmente piovosa (cfr. Figura 3.61). In tutti gli altri casi si hanno invece valori costanti, a prescindere

dalla presenza dell'intonaco idrorepellente, e tali da non dar luogo a un aumento del valore di trasmittanza termica della parete (cfr., esempio per la zona C2). Anche per la fibra di legno, i valori del contenuto d'acqua si mantengono pari a circa 9.5 M.% e dunque ben al di sotto della soglia critica del 18 M.%.

Nessuna delle varianti studiate presenta problemi di muffa sulla superficie interna della chiusura, a prescindere dal clima di esposizione e dalla presenza o meno dell'intonaco idrorepellente. Come osservato nelle altre tipologie di pareti, infatti, l'umidità relativa rimane annualmente costante, oscillando tra 40 % e 60 % UR e dunque ben al di sotto del limite critico posto a 80 % UR (cfr. Figura 3.62a per zona C2 senza idrorepellente).

L'ultima annotazione riguarda l'attacco gelo-disgelo: nella zona F, quella cioè con clima più rigido, la variante con lana minerale mostra livelli di umidità relativa sul lato freddo dell'isolante pari a 95 %, a prescindere dalla presenza dell'idrorepellente. Tale variante è pertanto da bocciare (cfr. Figura 3.62a, zona C2 con idrorepellente).

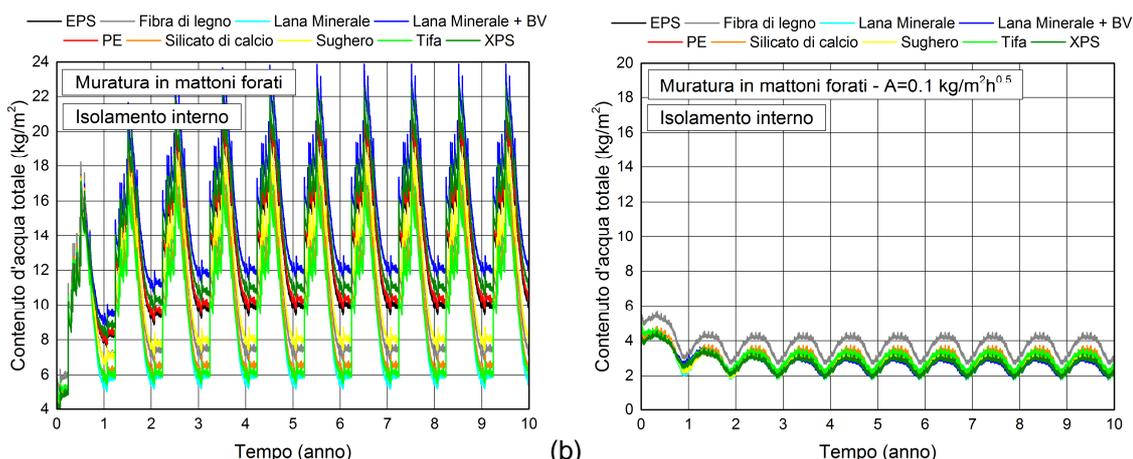


Figura 3.60 – Andamento del contenuto d'acqua totale nel tempo nella variante senza idrorepellente (a) e con idrorepellente (b), della parete in mattoni forati con isolamento interno nella zona C2.

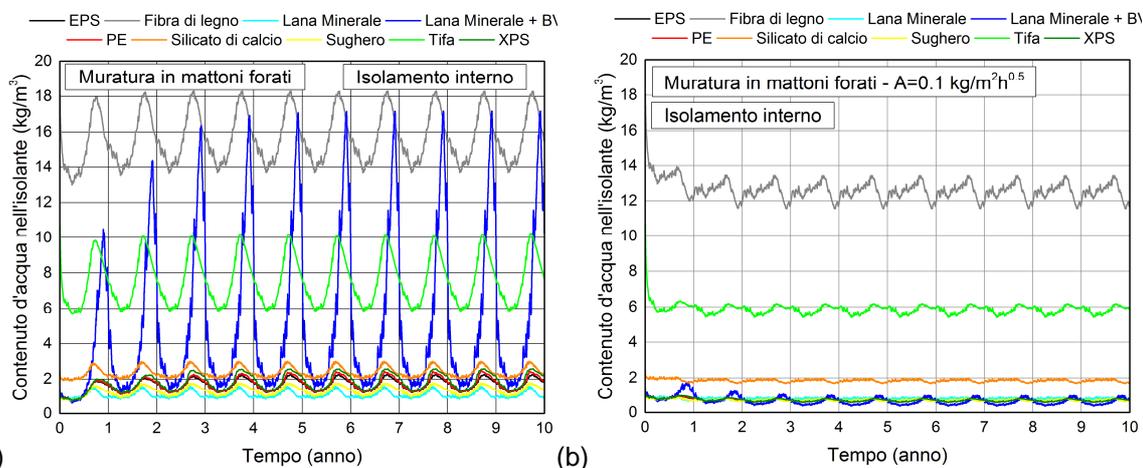


Figura 3.61 – Andamento del contenuto d'acqua nell'isolante nella variante senza idrorepellente (a) e con idrorepellente (b), della parete in mattoni forati con isolamento interno nella zona C2.

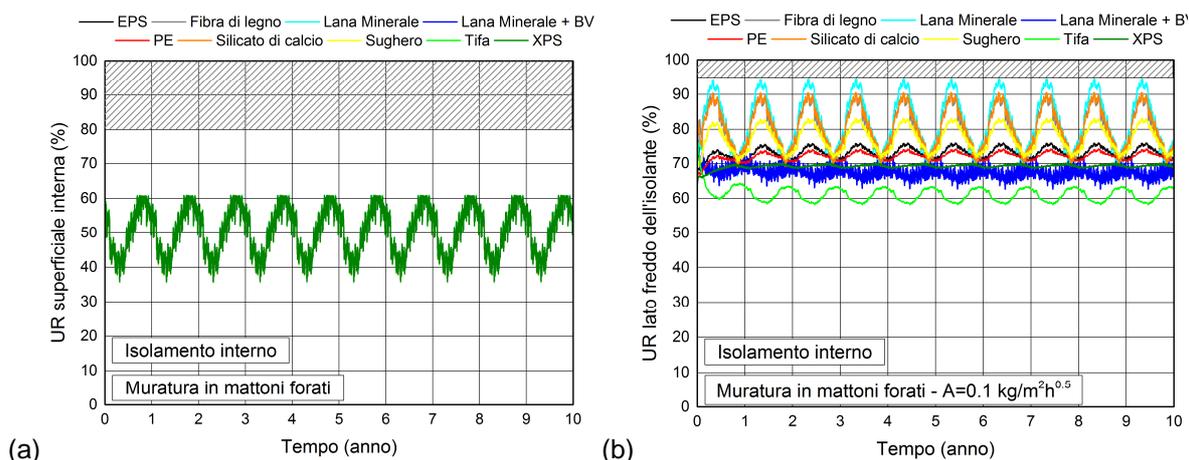


Figura 3.62 – Andamento di UR in funzione del tempo (a) sulla superficie interna e (b) sul lato freddo dell'isolante della parete in mattoni forati con isolamento interno senza idrorepellente (a) e con idrorepellente (b) nella zona F.

In conclusione, la muratura con mattoni forati isolata dall'interno presenta alcune criticità in assenza d'idrorepellenza dello strato esterno: le varianti con isolanti sintetici (XPS, EPS e PE) e con lana minerale dotata di barriera al vapore non funzionano in zona C2, per via del contenuto d'acqua crescente; le medesime varianti vanno accettate con riserva in zona C1, D2 e D3. Nel caso invece sia presente un'adeguata protezione dall'acqua piovana, i problemi segnalati non sussistono più. Non si segnalano problemi di muffa, mentre per via del gelo va esclusa la variante con lana minerale in zona F, a prescindere dalla presenza o meno dello strato esterno idrorepellente. Per la visione completa dei grafici relativi a questa sezione si rimanda all'Appendice (Figura A.80, Figura A.82, Figura A.84, Figura A.86, Figura A.88, Figura A.90, Figura A.92 e Figura A.94).

3.2.5.5 Muratura a cassa vuota

Isolamento esterno

Per l'isolamento esterno della muratura a cassa vuota sono stati considerati sei diversi tipi di isolante: EPS, XPS, PE, lana minerale, tifa e silicato di calcio.

Esaminando dapprima il contenuto d'acqua totale e nello strato isolante, si osserva un andamento decrescente durante il primo anno e poi costante nel seguito, con piccole oscillazioni stagionali in tutte le varianti considerate. I valori di umidità in ogni isolante sono modesti e tali da non produrre sostanziali differenze nelle prestazioni energetiche degli stessi. In Figura 3.63 si riporta a titolo d'esempio il caso di C1.

Il rischio di crescita microbologica è stato escluso in ogni variante. Nelle zone C, D2, D3 ed E2, malgrado il saltuario superamento della soglia critica di 80 % UR nel caso di isolamento con coibenti sintetici (XPS, EPS e PE) o con tifa, la verifica con WUFI® Bio ha mostrato l'assenza di problemi effettivi (cfr. Figura 3.64a, zona C1).

Nessuno dei casi analizzati, neanche in zona F, mostra problemi di gelo, come mostrato in Figura 3.64 b.

La muratura a cassa vuota con isolamento a cappotto è dunque priva di problemi, a prescindere dalla zona climatica di esposizione e dal tipo di isolante usato (cfr. Appendice, Figura A.113, Figura A.115, Figura A.117, Figura A.119, Figura A.121, Figura A.123, Figura A.125 e Figura A.127).

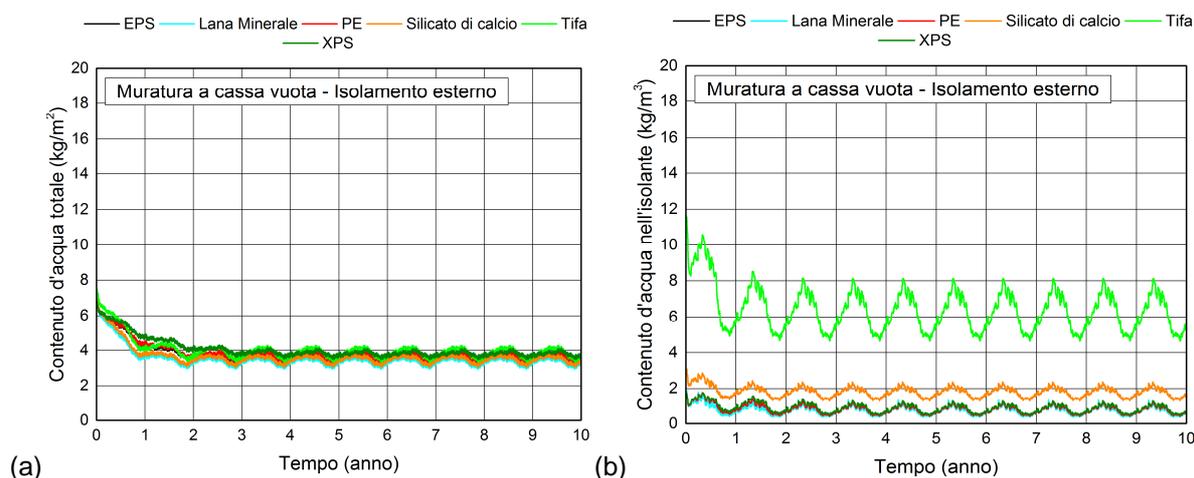


Figura 3.63 – Andamento del contenuto d’acqua totale (a) e nell’isolante (b) in funzione del tempo, nella parete a cassa vuota con isolamento a cappotto nella zona C1.

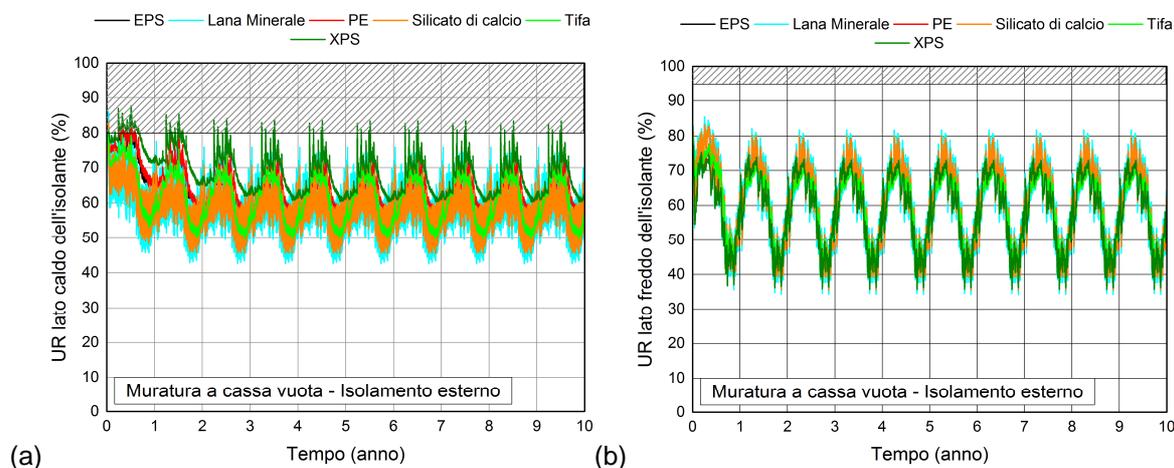


Figura 3.64 – Andamento di UR in funzione del tempo sul lato caldo dell’isolante (a) e sul lato freddo dell’isolante (b), nella parete a cassa vuota con isolamento a cappotto nella zona C1.

Isolamento in intercapedine

L’isolamento in intercapedine della muratura a cassa vuota è stato analizzato solo per un caso: isolamento di perlite e zona di esposizione C1. La scelta della perlite come esempio di materiale da insufflaggio non sensibile all’acqua è stata dettata da esigenze pratiche (reperibilità delle sue proprietà materiche nel database di WUFI®). Inoltre, solo in zona C1 la trasmittanza limite della chiusura risulta rispettata, tenendo come vincolo la geometria della cavità (60 mm).

Le analisi effettuate concludono che questa soluzione tecnica è priva di problemi: il contenuto d'acqua totale e nella perlite rimane costante (cfr. Figura 3.65), e non sussistono problemi di muffa o di gelo, come mostrato in Figura 3.66. Per la visione completa dei grafici relativi a questa chiusura si veda l'Appendice (Figura A.144).

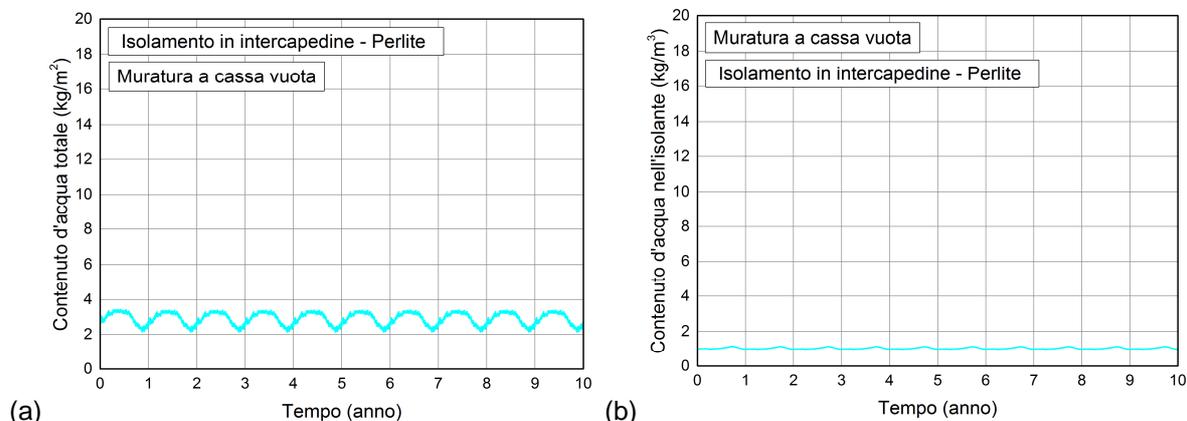


Figura 3.65 – Andamento del contenuto d'acqua totale (a) e nell'isolante (b) in funzione del tempo, nella parete a cassa vuota con isolamento in intercapedine nella zona C1.

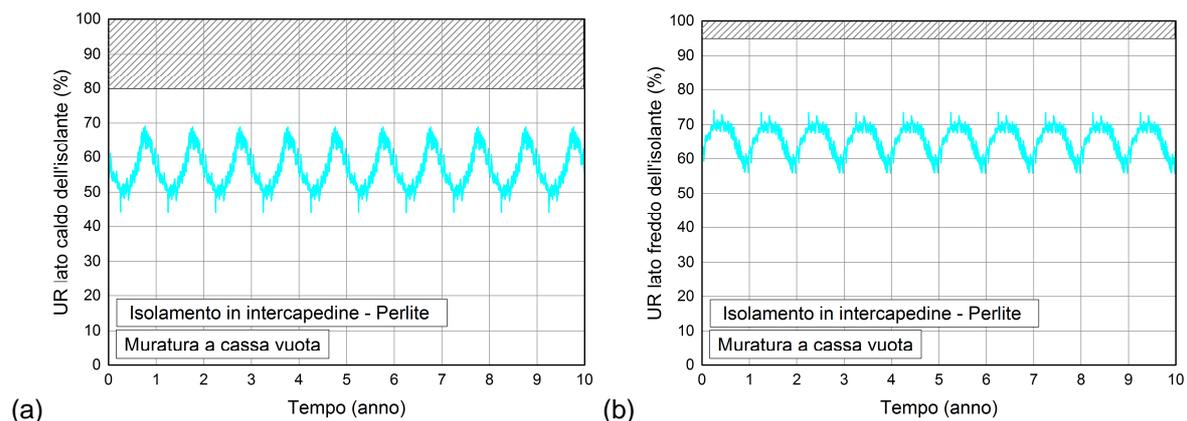


Figura 3.66 – Andamento di UR in funzione del tempo sul lato caldo dell'isolante (a) e sul lato freddo dell'isolante (b), nella parete a cassa vuota con isolamento in intercapedine nella zona C1.

Isolamento interno

Nel caso dell'isolamento interno, anche la muratura a cassa vuota è stata studiata in nove varianti differenti, che comprendono: EPS, XPS, PE, lana minerale con e senza barriera al vapore, tifa, silicato di calcio, sughero e fibra di legno.

Il contenuto d'acqua totale mostra andamento costante nella maggior parte dei casi senza idrorepellente, con un breve periodo di transitorio di durata pari a un anno, in cui l'umidità della costruzione subisce un leggero decremento. Fanno eccezione le varianti con lana minerale dotata di barriera al vapore e con isolanti sintetici nelle zone E2 ed F, che mostrano un andamento del contenuto d'acqua leggermente crescente. Ripetendo le simulazioni con contenuto iniziale di umidità maggiorato (80 % UR), tuttavia, il problema si risolve. Tali varianti possono dunque essere accettate con riserva. Applicando un intonaco esterno idrorepellente non si

evidenziano criticità (cfr. Figura 3.67 per la zona F). Va anche osservato che nelle zone C, D ed E1 non si evidenziano grandi differenze tra soluzioni tecniche con e senza intonaco idrorepellente esterno.

Osservazioni analoghe possono essere fatte in relazione al contenuto d'acqua nell'isolante (cfr. Figura 3.68 per la zona F). In particolare si nota come tutti gli isolanti abbiano andamento costante e valori simili nei due casi con e senza idrorepellente, tranne nelle varianti E2 ed F con lana minerale dotata di barriera al vapore. Qui il contenuto d'acqua aumenta leggermente, senza però arrivare a rappresentare un problema per le prestazioni energetiche della chiusura stessa.

Non si riscontrano mai problemi legati alla crescita microbologica sulla superficie interna della soluzione tecnica, poiché l'umidità relativa in questo punto oscilla tra 35 % e 60 % UR, mantenendosi ben al disotto del limite posto a 80 % UR. Questa affermazione vale per ogni clima, e la presenza dell'idrorepellente è ininfluente (in Figura 3.69a è visibile un esempio per la zona F).

Anche a proposito del gelo questo tipo di chiusura si mostra priva di problemi, a prescindere dal tipo d'isolante, zona climatica e presenza o meno dell'idrorepellente. Neanche la zona F, ovvero la più fredda, mostra criticità (cfr. Figura 3.69b).

In conclusione la muratura a cassa vuota si è dimostrata priva di problemi di muffa o gelo, in ogni zona climatica e nelle varianti con e senza idrorepellente, con ogni tipo d'isolante. Nelle zone E2 ed F senza protezione contro la pioggia il contenuto di umidità è leggermente crescente ma ancora accettabile nelle varianti con lana minerale dotata di barriera al vapore, XPS, EPS e PE. In generale si nota una scarsa differenza tra casi con e senza idrorepellente: questo tipo di muratura, infatti, in virtù dell'intercapedine d'aria che separa manto esterno e interno, garantisce di per sé un'adeguata protezione dall'acqua piovana, a meno di zone particolarmente piovose ed esposte come la E2 e la F. Per la visione completa dei grafici si rimanda all'Appendice (cfr. Figura A.112, Figura A.114, Figura A.116, Figura A.18, Figura A.120, Figura A.122, Figura A.124 e Figura A.126).

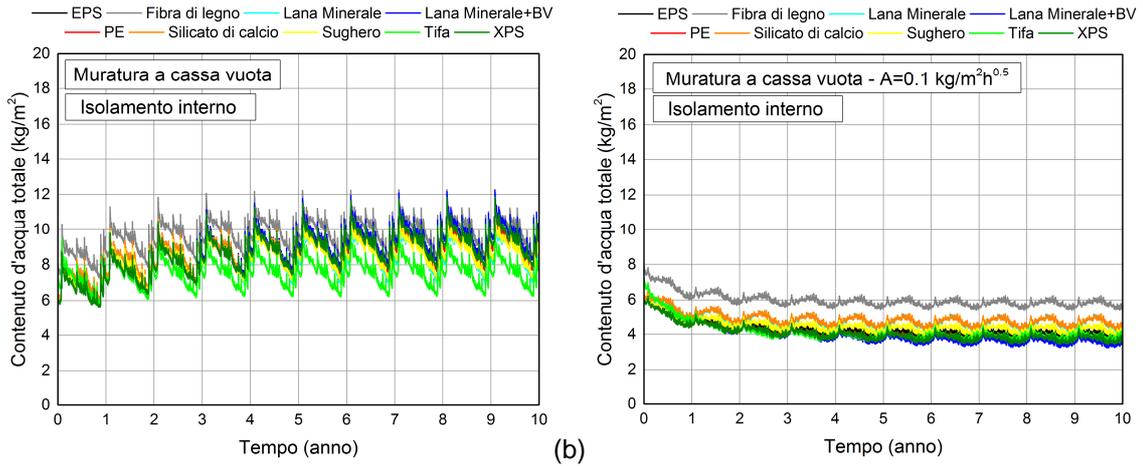


Figura 3.67 – Andamento del contenuto d'acqua totale nel tempo nella variante senza idrorepellente (a) e con idrorepellente (b), della parete a cassa vuota con isolamento interno nella zona F.

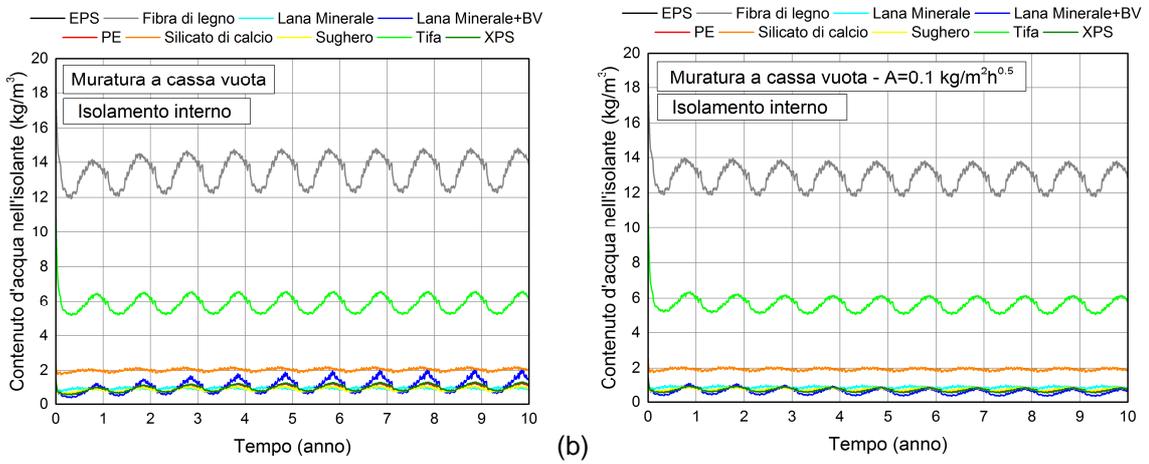


Figura 3.68 – Andamento del contenuto d'acqua nell'isolante nella variante senza idrorepellente (a) e con idrorepellente (b), della parete a cassa vuota con isolamento interno nella zona F.

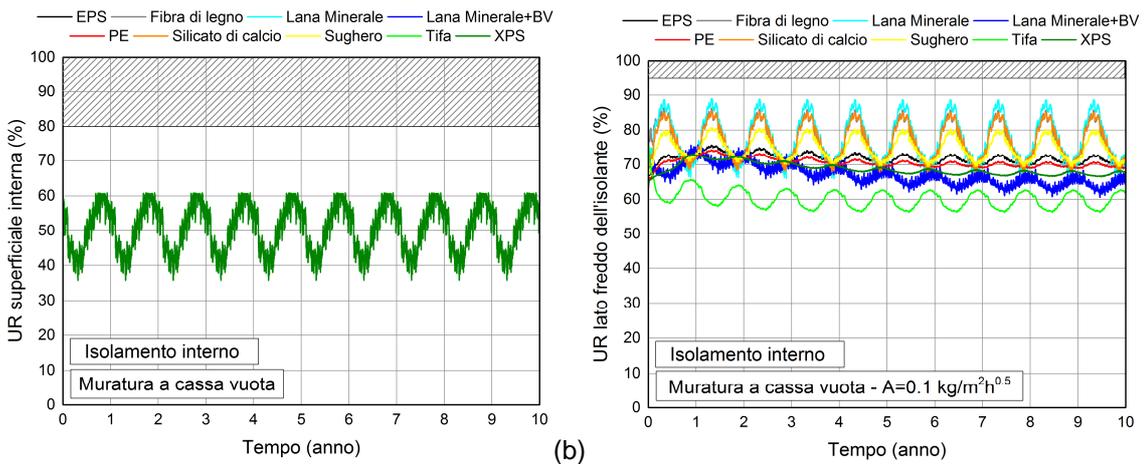


Figura 3.69 – Andamento di UR in funzione del tempo (a) sulla superficie interna e (b) sul lato freddo dell'isolante della parete a cassa vuota con isolamento interno senza idrorepellente nella zona F.

3.2.5.6 Muratura in calcestruzzo alleggerito

Isolamento esterno

L'isolamento esterno della muratura in calcestruzzo alleggerito è stato esaminato con sei diversi tipi di isolante: EPS, XPS, PE, lana minerale, tifa e silicato di calcio.

Considerando dapprima il contenuto d'acqua totale e nello strato isolante, si osserva un andamento decrescente durante il primo anno e poi costante nel seguito, con piccole oscillazioni stagionali in tutte le varianti considerate. Si nota nel confronto fra i materiali isolanti, che l'applicazione della tifa porta a un aumento del contenuto d'acqua della soluzione, ma i valori di umidità sono comunque modesti e tali da non produrre sostanziali differenze nelle prestazioni energetiche dello stesso. In Figura 3.70 si riporta a titolo d'esempio il caso di E2.

Il rischio di crescita microbologica è stato escluso in ogni variante. Nelle zone C, D2, D3 ed E2, malgrado il saltuario superamento della soglia critica di 80 % UR nel caso di isolamento con coibenti sintetici (XPS, EPS e PE) o con tifa, la verifica con WUFI® Bio ha mostrato l'assenza di problemi effettivi (cfr. Figura 3.71 a, zona E2).

Con riferimento al rischio gelo, i valori di umidità registrati sul lato freddo dell'isolante si mantengono al di sotto del 95 % UR nelle zone C, D ed E1. Passando invece a climi più freddi, rappresentati dalle zone E2 ed F, si nota un superamento della soglia critica nelle varianti con lana minerale e silicato di calcio (cfr. Figura 3.71 b, zona E2).

Alla luce delle verifiche fatte si può asserire che la muratura in calcestruzzo alleggerito con isolamento esterno funziona in ogni clima, tranne che nelle zone fredde E2 ed F, dove insorgono problemi legati al gelo nelle varianti con lana minerale e silicato di calcio (cfr. Appendice, Figura A.97, Figura A.99, Figura A.101, Figura A.103, Figura A.105, Figura A.107, Figura A.109 e Figura A.111).

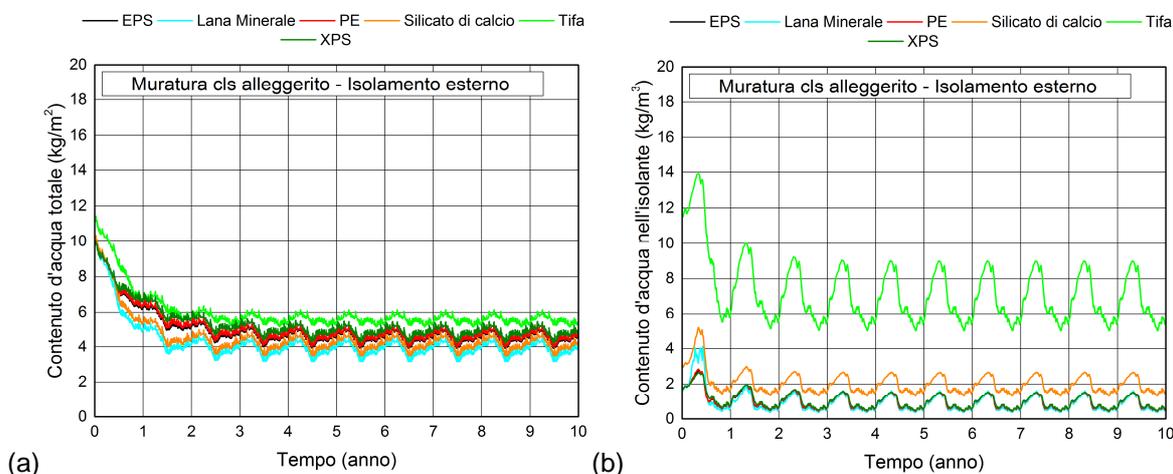


Figura 3.70 – Andamento del contenuto d'acqua totale (a) e nell'isolante (b) in funzione del tempo, nella muratura in calcestruzzo alleggerito con isolamento a cappotto nella zona E2.

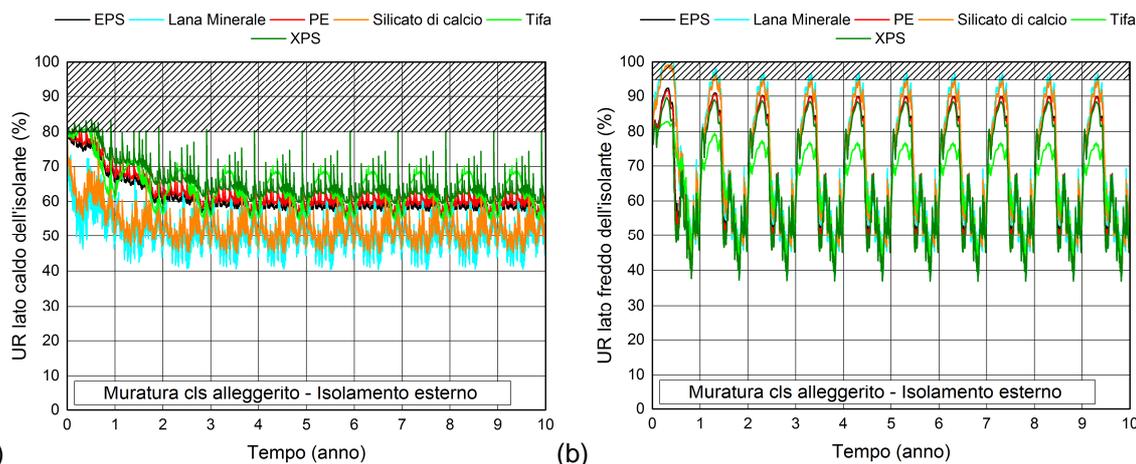


Figura 3.71 – Andamento di UR in funzione del tempo sul lato caldo dell'isolante (a) e sul lato freddo dell'isolante (b), nella muratura in calcestruzzo alleggerito con isolamento a cappotto nella zona E2.

Isolamento interno

Le varianti prese in esame per l'isolamento interno della muratura in calcestruzzo alleggerito sono nove, e comprendono: EPS, XPS, PE, tifa, lana minerale con e senza barriera al vapore, silicato di calcio, fibra di legno e sughero. Ogni variante è stata analizzata in presenza e in assenza di uno strato d'intonaco esterno con proprietà idrorepellenti.

Il comportamento igrometrico di questa chiusura in assenza d'intonaco idrorepellente mostra delle criticità nella zona C2: qui si riscontra un aumento del contenuto d'acqua totale, cui corrisponde anche un aumento del contenuto d'acqua nello strato isolante, nelle varianti isolate con XPS, EPS, PE e lana minerale con barriera al vapore. Nonostante ciò, le varianti con lana minerale e barriera al vapore, XPS, EPS e PE si possono accettare con riserva. Ripetendo le simulazioni col 90 % UR iniziale, infatti, la prima variante raggiunge l'equilibrio dopo circa 9 anni, con un andamento leggermente decrescente, stabilizzandosi a 19 kg/m^3 , mentre l'UR sul lato freddo dell'isolante raggiunge un massimo di 92 %. Nelle altre varianti ciò avviene nel giro di 3-4 anni, con un contenuto d'acqua pari a 17.5 kg/m^3 ; sul lato freddo dell'isolante si arriva a circa 83 % UR. Tali problemi si risolvono qualora la parete sia dotata di un'adeguata protezione contro la pioggia, che ne impedisca l'accumulo al suo interno. Ciò è ben visibile nella Figura 3.72, che confronta il contenuto d'acqua totale in assenza (a) e in presenza (b) d'intonaco esterno idrorepellente, in zona C2. Osservazioni analoghe possono essere fatte in relazione al contenuto d'acqua nell'isolante (cfr. Figura 3.73 per la zona C2). In particolare si nota come tutti gli isolanti abbiano andamento costante, fatta eccezione per la lana minerale con barriera al vapore, che nel tempo accumula umidità. In tutti i casi, però, tale accumulo non rappresenta un problema per le prestazioni energetiche della chiusura stessa. Anche per la fibra di legno, i valori del contenuto d'acqua si mantengono pari a circa 9.5 M.% e dunque ben al di sotto della soglia critica del 18 M.%.

Nessuna delle varianti studiate presenta problemi di muffa sulla superficie interna della chiusura, a prescindere dal clima di esposizione e dalla presenza o meno dell'intonaco idrorepellente. Come osservato nelle altre tipologie di pareti, infatti, l'umidità relativa rimane annualmente costante, oscillando tra 40 % e 60 % UR e dunque ben al di sotto del limite critico posto a 80 % UR (cfr. Figura 3.74 a per zona C2 senza idrorepellente).

L'ultima annotazione riguarda l'attacco gelo-disgelo: nella zona F, quella cioè con clima più rigido, la variante con lana minerale mostra livelli di umidità relativa sul lato freddo dell'isolante pari a 95 %, a prescindere dalla presenza dell'idrorepellente. Tale soluzione è pertanto da bocciare (cfr. Figura 3.74 b, zona F con idrorepellente).

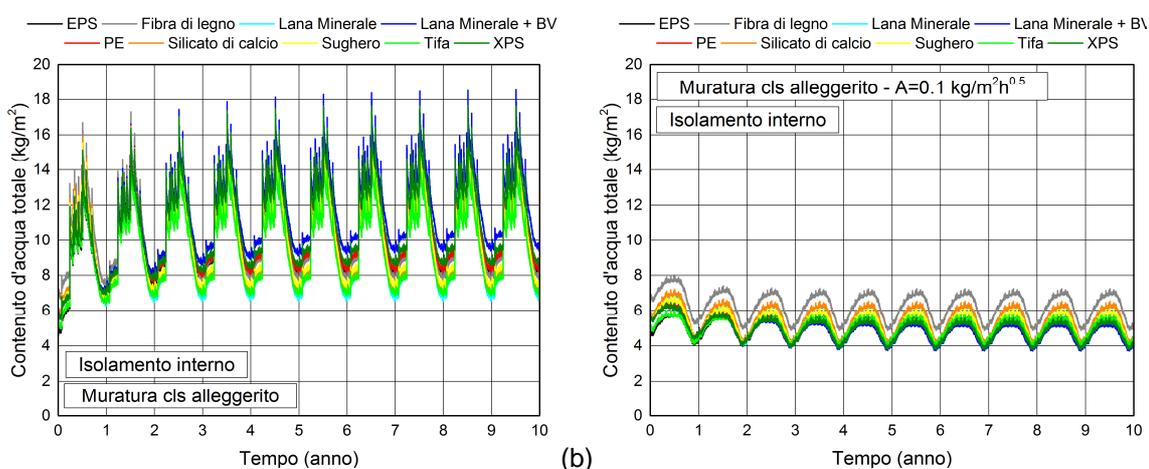


Figura 3.72 – Andamento del contenuto d'acqua totale nel tempo nella variante senza idrorepellente (a) e con idrorepellente (b), della parete in calcestruzzo alleggerito con isolamento interno in zona C2.

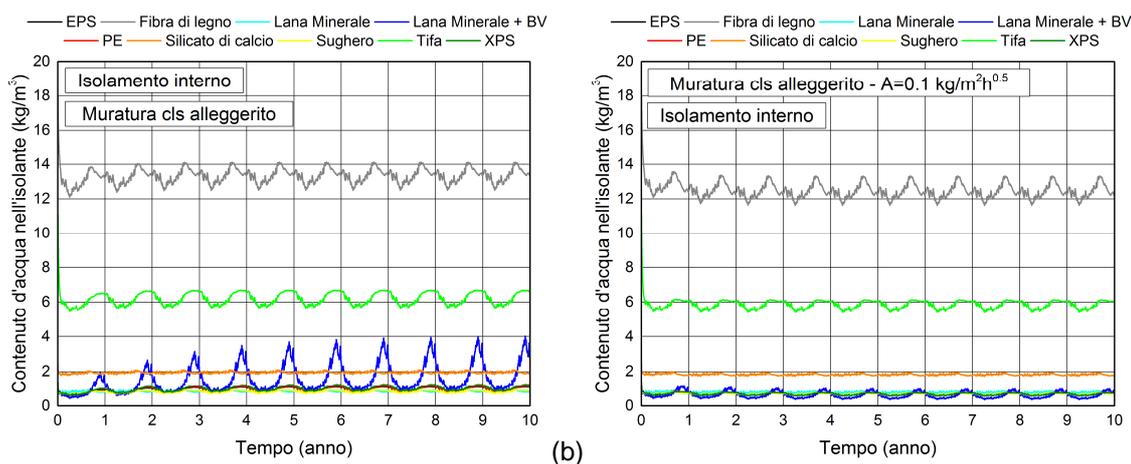


Figura 3.73 – Andamento del contenuto d'acqua nell'isolante nella variante senza idrorepellente (a) e con idrorepellente (b), della parete in calcestruzzo alleggerito con isolamento interno nella zona C2.

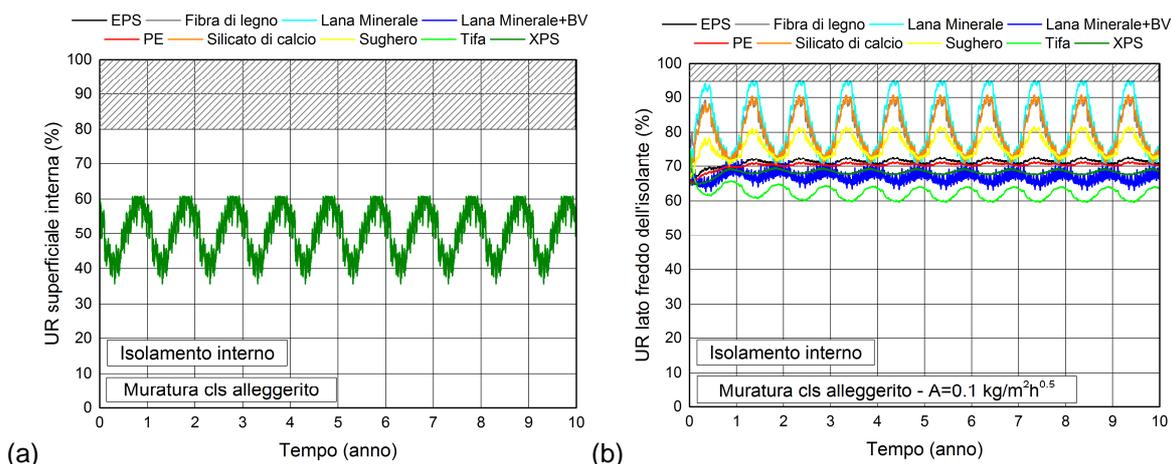


Figura 3.74 – Andamento di UR in funzione del tempo (a) sulla superficie interna e (b) sul lato freddo dell’isolante della parete in calcestruzzo alleggerito con isolamento interno senza idrorepellente (a) e con idrorepellente (b) nella zona F.

In conclusione, la muratura in calcestruzzo alleggerito isolata dall’interno presenta alcune criticità in assenza dello strato esterno idrorepellente: è questo il caso delle varianti con isolanti sintetici (XPS, EPS e PE) e con lana minerale dotata di barriera al vapore in zona C2, che presentano un contenuto d’acqua crescente; tuttavia, ulteriori accertamenti hanno mostrato che tali soluzioni tecniche possono essere accettate con riserva. Nel caso invece sia presente un’adeguata protezione dall’acqua piovana, i problemi segnalati non sussistono più. Non si hanno problemi di muffa, mentre per via del gelo va esclusa la variante con lana minerale in zona F, a prescindere dalla presenza o meno dello strato esterno idrorepellente. Per la visione completa dei grafici concernenti questa sezione si rimanda all’Appendice (Figura A.96, Figura A.98, Figura A.100, Figura A.102, Figura A.104, Figura A.106, Figura A.108 e Figura A.110).

3.2.5.7 Muratura in calcestruzzo

Isolamento esterno

Per l’isolamento esterno della muratura in calcestruzzo sono stati considerati sei diversi tipi di isolante: EPS, XPS, PE, lana minerale, tifa e silicato di calcio.

Il contenuto d’acqua totale e nell’isolante decresce durante tutto il periodo di simulazione. A titolo di esempio, in Figura 3.75 si riportano il contenuto d’acqua totale e nell’isolante per la zona C1 (ma andamento analogo si ha anche nelle altre zone climatiche). I valori del contenuto d’acqua qui registrati non sono problematici in termini di aumento della conducibilità termica (nell’ordine di 10^{-4} W/mK).

Nelle zone C, D, E ed F una prima analisi ha fatto pensare a possibili problemi di muffa sul lato caldo dell’isolante, nelle varianti con EPS, XPS, PE e talvolta tifa, visto il saltuario superamento del limite di 80 % UR (cfr. Figura 3.76a, esempio per la zona

C1); tuttavia, ulteriori indagini compiute con l'ausilio di WUFI® Bio hanno mostrato l'assenza di attacco microbiologico.

Con riferimento al rischio gelo, i valori di umidità registrati sul lato freddo dell'isolante si mantengono al di sotto del 95 % UR nelle zone C, D ed E1. Passando invece a climi più freddi, rappresentati dalle zone E2 ed F, si nota un superamento della soglia di umidità critica nelle varianti con lana minerale e silicato di calcio (cfr. Figura 3.76 b per la zona F).

Alla luce delle verifiche fatte si può asserire che la muratura in calcestruzzo con isolamento esterno funziona in ogni clima preso in esame, tranne che nelle zone fredde E2 ed F, dove insorgono problemi legati al gelo nelle varianti con lana minerale e silicato di calcio (cfr. Appendice, Figura A.129, Figura A.131, Figura A.133, Figura A.135, Figura A.137, Figura A.139, Figura A.141 e Figura A.143).

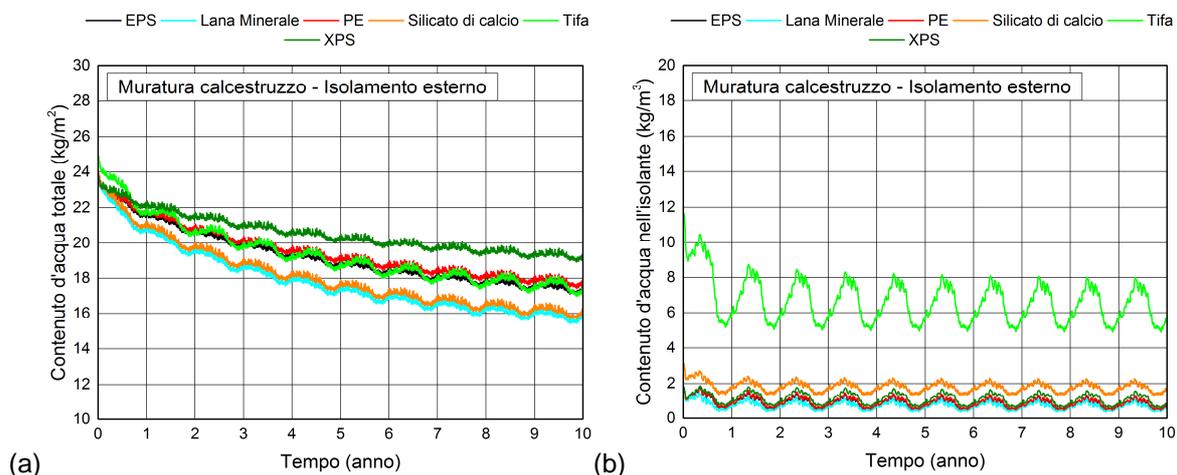


Figura 3.75 – Andamento del contenuto d'acqua totale (a) e nell'isolante (b) in funzione del tempo, nella parete in calcestruzzo con isolamento esterno nella zona C1.

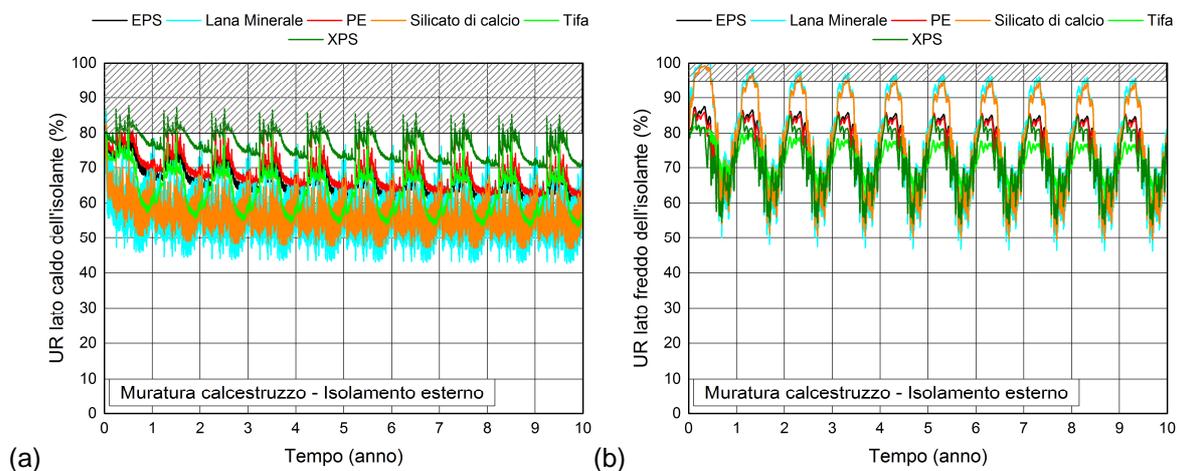


Figura 3.76 – Andamento di UR in funzione del tempo sul lato caldo dell'isolante in zona C1 (a) e sul lato freddo dell'isolante in zona F (b), nella parete in calcestruzzo con isolamento esterno.

Isolamento interno

Le varianti prese in esame per l'isolamento interno della muratura in calcestruzzo sono nove, e comprendono: EPS, XPS, PE, tifa, lana minerale con e senza barriera al vapore, silicato di calcio, fibra di legno e sughero. Ogni variante è stata analizzata in presenza e in assenza di uno strato d'intonaco esterno con proprietà idrorepellenti.

Nelle zone C1, D ed E1, le simulazioni ripetute con un'umidità iniziale maggiorata (90 % UR) hanno mostrato il raggiungimento delle condizioni di equilibrio nel contenuto d'acqua totale dopo 1-2 anni, in tutte le varianti studiate; lo stesso fenomeno si osserva per il contenuto d'acqua nell'isolante. Queste varianti possono essere pertanto accettate, anche se con riserva.

Il comportamento igrometrico di questa chiusura in assenza d'intonaco idrorepellente mostra delle criticità in tutte le zone climatiche, per via dell'aumento del contenuto d'acqua in tutte le varianti analizzate. Per questo motivo si sono ripetute tutte le simulazioni, aumentando l'umidità iniziale (90 % UR), per cercare d'intercettare di stabilire se la chiusura raggiunge l'equilibrio dinamico e se si in corrispondenza di quali valori. Nelle zone C1, D, E ed F, queste ulteriori simulazioni hanno mostrato il raggiungimento delle condizioni di equilibrio nel contenuto d'acqua totale dopo 1-2 anni, in tutte le varianti studiate; lo stesso fenomeno si osserva per il contenuto d'acqua nell'isolante. Queste varianti possono essere pertanto accettate, anche se con riserva. Nel caso della zona C2, invece, le varianti con lana minerale dotata di barriera al vapore e con isolanti sintetici continuano a non raggiungere l'equilibrio, con un aumento del contenuto d'acqua totale e nello strato isolante. Esse vanno pertanto bocciate. In presenza di idrorepellente, invece, la maggior parte di queste criticità scopre (cfr. Figura 3.77 per la zona C2). Solo nelle zone più fredde E ed F (Figura 3.78) si ha un leggero aumento del contenuto d'acqua totale, soprattutto nei materiali isolanti a celle aperte. Tuttavia, le simulazioni di controllo effettuate permettono di accettare anche queste varianti, seppure con riserva.

Nessuno dei casi presenta problemi di muffa sulla superficie interna della chiusura, a prescindere dal clima di esposizione e dalla presenza o meno dell'intonaco idrorepellente. (cfr. Figura 3.74 a per zona F senza idrorepellente).

Nelle zone E ed F le varianti con lana minerale, fibra di legno e silicato di calcio (queste ultime solo in F), mostrano livelli di umidità relativa sul lato freddo dell'isolante pari a 95-96 %, a prescindere dalla presenza dell'idrorepellente. Tali soluzioni hanno quindi problemi di gelo-disgelo e sono pertanto da bocciare (cfr. Figura 3.79 b, zona F con idrorepellente).

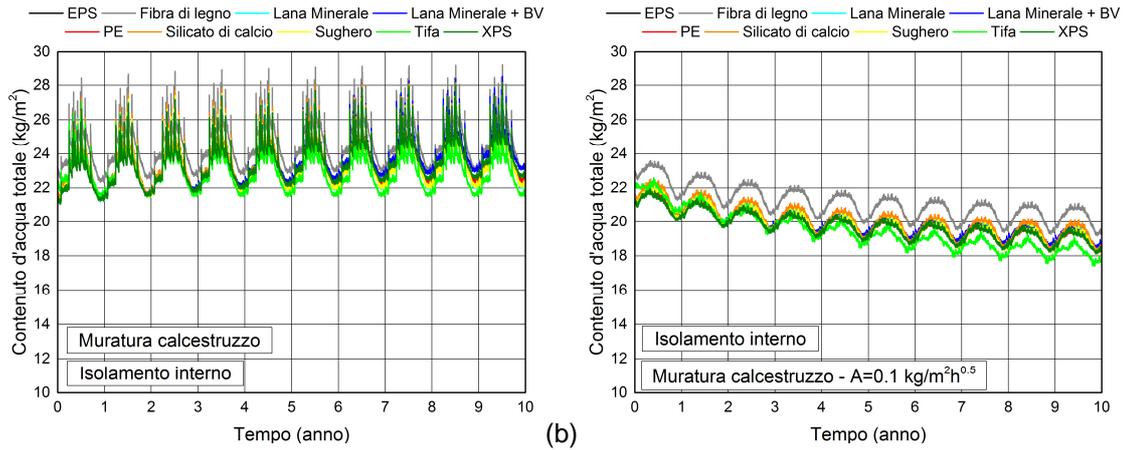


Figura 3.77 – Andamento del contenuto d'acqua totale nel tempo nella variante senza idrorepellente (a) e con idrorepellente (b), della parete in calcestruzzo con isolamento interno nella zona C2.

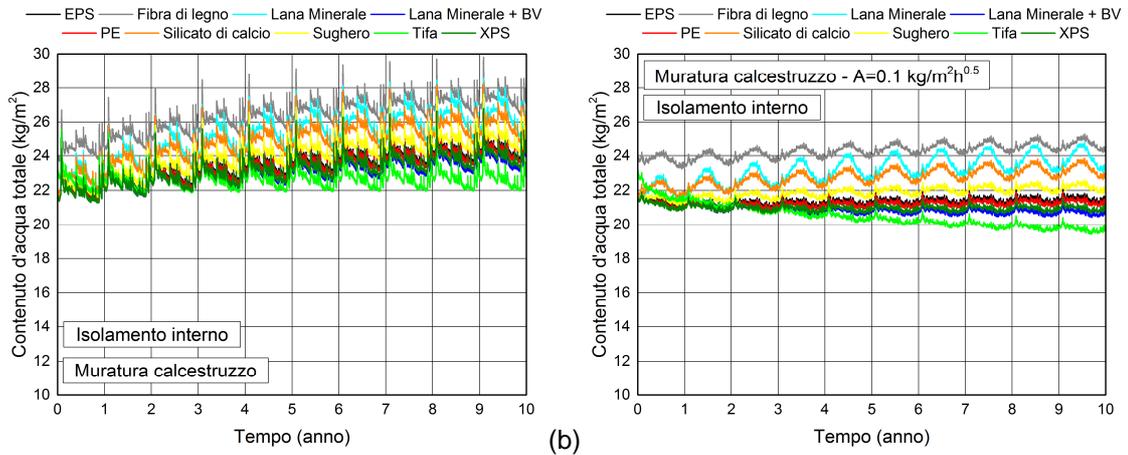


Figura 3.78 – Andamento del contenuto d'acqua totale nel tempo nella variante senza idrorepellente (a) e con idrorepellente (b), della parete in calcestruzzo con isolamento interno nella zona F.

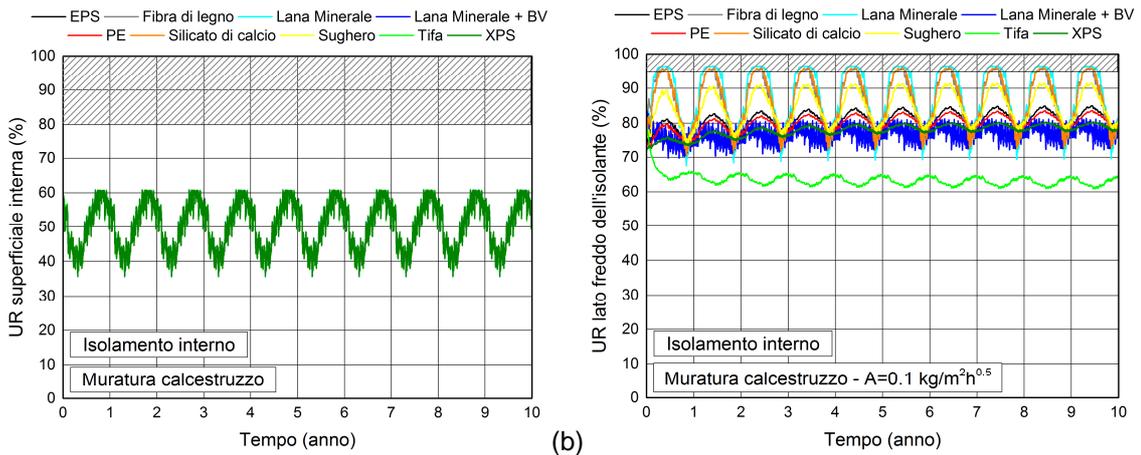


Figura 3.79 – Andamento di UR in funzione del tempo (a) sulla superficie interna e (b) sul lato freddo dell'isolante della parete in calcestruzzo con isolamento interno senza idrorepellente (a) e con idrorepellente (b) nella zona F.

In conclusione, la muratura in calcestruzzo isolata dall'interno presenta molte criticità, soprattutto in assenza di strato esterno idrorepellente, per via del contenuto d'acqua crescente. Ulteriori analisi permettono però di accettare con riserva tutte le varianti studiate, tranne quelle in C2, senza idrorepellente, con lana minerale dotata di barriera al vapore, XPS, EPS e PE. Non si segnalano problemi di muffa, mentre per via del gelo va esclusa la variante con lana minerale nelle zone E ed F, mentre nella zona F si devono bocciare anche con il silicato di calcio e fibra di legno, a prescindere dalla presenza o meno dello strato esterno idrorepellente. Per la visione completa dei grafici relativi a questa sezione si rimanda all'Appendice (Figura A.128, Figura A.130, Figura A.132, Figura A.134, Figura A.136, Figura A.138, Figura A.140 e Figura A.142).

3.2.5.8 *Sinossi dei risultati*

Alla luce dei risultati esposti nei paragrafi precedenti, al termine di questo studio è stato possibile classificare tutte le soluzioni tecniche analizzate, stabilendo per ognuna di esse se funzionano nelle otto zone climatiche prese in considerazione o se invece debbano essere scartate, indicandone al contempo il motivo.

A questo scopo, la tabella 3.3 presenta la sinossi dei risultati ottenuti. A ogni riga della tabella corrisponde una delle sette soluzioni tecniche, ognuna delle quali a sua volta divisa in isolamento esterno, interno ed eventualmente in intercapedine. Per l'isolamento interno si distinguono ancora i due casi, con e senza idrorepellente. Le colonne identificano le diverse varianti, ovvero il tipo d'isolante usato, e le otto zone climatiche di esposizione. Le caselle verdi indicano soluzioni tecniche verificate e funzionanti, mentre quelle bianche identificano casi non trattati. Le caselle verdi contrassegnate dalla lettera M indicano soluzioni tecniche verificate con WUFI[®] Bio, ovvero quelle in cui sul lato caldo dell'isolante si è riscontrato un superamento dei limiti igrometrici che però non danno luogo a un'effettiva crescita microbiologica. A questo proposito il colore giallo contrassegnato dalla medesima lettera M dovrebbe indicare casi di muffa; si nota però che esso non è mai stato usato, ovvero non sussistono casi di muffa sulla superficie interna delle soluzioni tecniche studiate. Le caselle azzurre indicano problemi di attacco gelo-disgelo e sono contrassegnate dalla lettera G. Con la lettera W si segnalano i casi in cui il contenuto d'acqua nella soluzione tecnica ha un andamento anomalo: in particolare, i casi più gravi sono marcati in rosso (umidità crescente), mentre quelli meno seri in arancione (umidità costante o in lieve aumento).

Per quanto concerne l'isolamento esterno, le murature lapidee e quella a cassa vuota non hanno mai problemi, a prescindere dall'isolante usato e dal clima a cui sono esposte. Le altre chiusure analizzate funzionano sempre nelle zone C e D, mentre in quelle più fredde, E2 ma soprattutto F, hanno spesso problemi di gelo-disgelo nelle varianti con lana minerale, silicato di calcio e fibra di legno. Le

preoccupazioni riguardo alla presenza di muffa sono state sempre fugate dopo aver eseguito analisi mirate col programma WUFI® Bio.

L'isolamento in intercapedine, nell'unico caso studiato, si è rivelato privo di problemi. Tale considerazione si può estendere non solo alla variante con perlite, ma a ogni altra variante che utilizzi materiali isolanti non sensibili all'acqua.

L'isolamento interno è invece quello che presenta le maggiori criticità e va pertanto usato con attenzione, soprattutto se non s'intende abbinarlo con la posa di un nuovo intonaco esterno idrorepellente. Nei casi in cui questo è presente, infatti, si vede come la maggior parte delle soluzioni tecniche analizzate sia priva di problemi. Si riscontrano solo alcune criticità legate al gelo nelle zone più fredde (F e talvolta anche E) nelle murature in arenaria, mattone forato, calcestruzzo e calcestruzzo alleggerito isolate con lana minerale, silicato di calcio e fibra di legno. Quando invece la muratura non è dotata di uno strato esterno idrorepellente, che permetta di controllare l'afflusso di acqua all'interno della chiusura, non solo si hanno i sunnominati problemi di gelo-disgelo, ma spesso il contenuto d'acqua totale continua ad aumentare a causa del potenziale di asciugamento ridotto dalla presenza d'isolanti sintetici come XPS, EPS e PE, o di lana minerale combinata con una barriera al vapore. A questo proposito la chiusura più problematica è quella in calcestruzzo, ma sono coinvolte anche le pareti in mattoni pieni e forati. La zona climatica più colpita dal problema è la C2, molto piovosa, quella meno coinvolta è la D1, che è caratterizzata dal clima più arido.

Il clima esterno influenza dunque fortemente l'esito delle simulazioni, in particolare il grado di piovosità delle diverse zone considerate. Si comprende dunque l'importanza, nel prossimo futuro, di avere a disposizione dati climatici attendibili. Anche l'orientamento influisce naturalmente sul risultato della simulazione. In questo studio si sono considerati sempre i lati esposti alla pioggia battente, situazione questa abbastanza gravosa. Risultati forse ancora peggiorativi si possono riscontrare scegliendo l'esposizione nord, per via del ridotto apporto della radiazione solare.

Anche la scelta del clima interno ha la sua influenza sui risultati delle simulazioni: si noterà infatti l'assenza, nei casi studiati, di problemi di muffa. Ciò è ovviamente legato a questa scelta, che in questa tesi è caduta sulla UNI EN 15026. In futuro potrebbe essere interessante completare questo studio considerando altre condizioni al contorno per l'ambiente interno.

Conclusioni

Lo scopo che questa ricerca ha cercato di perseguire è quello di offrire una panoramica delle possibilità offerte dalle simulazioni igrotermiche dinamiche, basandosi sullo studio di diverse soluzioni tecniche, per il risanamento energetico di strutture opache verticali esistenti e avere un confronto diretto dell'efficienza igrotermica di nuove e vecchie tecnologie, secondo le diverse caratteristiche climatiche italiane e nel rispetto della legislazione vigente.

La ricerca ha preso le mosse da un'approfondita analisi dello stato dell'arte e della legislazione in tema di risanamento energetico e di verifiche igrotermiche in Italia e in Europa, chiarendo al contempo le differenze tra metodi di verifica tradizionali e simulazioni dinamiche (UNI EN 15026), ancora poco note nel nostro Paese. A questo proposito si è posta particolare enfasi sulla necessità di superare i vincoli imposti dal metodo semplificato di Glaser (UNI EN ISO 13788) e dal recente DM 26/6/2015, entrambi fin troppo limitanti e legati al calcolo igrotermico stazionario basato sul mero trasporto diffusivo. In particolar modo appare priva di senso – e in controtendenza con la normativa europea – la scelta del legislatore italiano di imporre l'assenza assoluta di condensa, verificata peraltro con un metodo così semplificato e poco aderente alla realtà, in soluzioni tecniche costituite da materiali che sono per natura igroscopici e dunque in grado di accumulare umidità al proprio interno senza che questo abbia necessariamente delle ripercussioni sulle prestazioni energetiche e durabilistiche della chiusura stessa.

È importante, infatti, non fermarsi alla mera valutazione del rischio di condensa superficiale e interstiziale, ma considerare anche altri fenomeni, quali l'attacco biologico, il gelo/disgelo, la corrosione, la marcescenza del legno e il decadimento delle prestazioni energetiche in funzione delle condizioni igrotermiche. Per tali valutazioni le simulazioni dinamiche sono invece particolarmente adatte. Esse inoltre si basano su un meccanismo di calcolo instazionario che considera simultaneamente il trasporto e l'accumulo di calore e umidità nei materiali edili, il comportamento dell'utenza, l'influenza delle condizioni iniziali e del clima, ivi compresa la pioggia e la radiazione solare, rispecchiando così una situazione molto più vicina alla realtà e offrendo pertanto risultati più attendibili e precisi.

Tuttavia, per garantire tali risultati, le simulazioni hanno bisogno di una mole di dati d'ingresso molto superiore a quelli finora richiesti e dunque disponibili in Italia. Ci si riferisce in particolare ai dati climatici e alle proprietà dei materiali, entrambi carenti o addirittura mancanti. Questo studio ha dunque provveduto, almeno in parte, a colmare suddette lacune, reperendo in letteratura e nella normativa ed eventualmente completando le informazioni necessarie per poter eseguire

simulazioni dinamiche di chiusure verticali rappresentative del contesto edilizio italiano in climi tipici del nostro Paese. Per le proprietà dei materiali è stata sufficiente un'accurata ricerca bibliografica, coadiuvata dai dati sperimentali forniti del Fraunhofer IBP. Per i dati climatici, invece, si è trattato di un processo più complesso, approdato infine al riconoscimento di otto sottozone climatiche italiane (C1, C2, D1, D2, D3, E1, E2 ed F dalla più calda e secca alla più fredda e piovosa, cfr. Figura 2.20), così divise in base alle medie annuali della temperatura e della piovosità, ottenute combinando informazioni desunte dalle norme (UNI 10349) con dati misurati da vari enti (ENEA, AMI, MIPAAF). Per ogni zona è stata scelta una località di riferimento e, dove mancante, ne è stato creato il file climatico in modo da ottenere il cosiddetto *Test Reference Year* o TRY. Così, accanto ai preesistenti TRY per Belluno (F), Milano (E2) e Bolzano (E1), sono stati redatti quelli per Cosenza (D3), Bari (D2), Oristano (D1), Agrigento (C2) e Catania (C1).

Una volta completata la fase di reperimento dei dati d'ingresso si sono eseguite le simulazioni vere e proprie, analizzando, col programma di simulazione igrotermica dinamica monodimensionale WUFI[®] Pro, sette tipi diversi di chiusure: muratura lapidea in arenaria e tufo, muratura in mattoni pieni e forati, muratura a cassa vuota, muratura in calcestruzzo normale e alleggerito. Per ognuna di queste soluzioni tecniche si è considerato un intervento di risanamento energetico con isolamento esterno, interno (con e senza intonaco esterno idrorepellente) e – dove possibile – in intercapedine. Allo scopo sono stati usati vari coibenti: EPS, XPS, PE, lana minerale, fibra di legno, sughero, silicato di calcio, perlite e tifa – un materiale ecosostenibile e innovativo studiato presso il Fraunhofer IBP. Ognuna di queste varianti è stata poi simulata nelle otto sottozone climatiche precedentemente individuate, mentre il clima interno è stato calcolato dalla temperatura dell'aria esterna in base al modello proposto dalla norma UNI EN 15026.

Le combinazioni così ottenute – più di mille – hanno permesso di evidenziare il comportamento igrotermico delle varie soluzioni tecniche studiate, dando luogo a risultati variegati, che sono stati attentamente vagliati e confrontati con diversi criteri di accettazione normati e/o sperimentali. In particolare, dopo aver verificato l'assenza di condensazione interstiziale, si è analizzato il rischio d'insorgenza di muffa, gelo, decadimento delle prestazioni energetiche e diminuzione del potenziale di asciugamento (cfr. abella 3.3).

Colpisce in primo luogo l'assenza di problemi di muffa – verificata con l'ausilio del post-processore WUFI[®] Bio – sia nelle chiusure isolate dall'interno sia in quelle con isolamento a cappotto. Ciò dipende senz'altro dalla scelta del modello usato per il clima interno.

L'attacco del gelo si ha soltanto nelle zone climatiche più fredde (F, E2 e talvolta E1), ma solo con gli isolanti più sensibili quali lana minerale, fibra di legno e silicato di

calcio. Per l'isolamento a cappotto tale problema coinvolge tutte le chiusure considerate tranne le murature lapidee e a cassa vuota. Con l'isolamento interno solo le murature a cassa vuota e in tufo ne sono esenti – ma quest'ultima non è stata simulata nei climi più freddi, in quanto tipica della sola Italia centro-meridionale. La presenza dello strato esterno idrorepellente è qui ininfluenza.

La diminuzione del potenziale di asciugamento è un problema tipico delle soluzioni tecniche risanate dall'interno con isolanti poco permeabili al vapore – qui esemplificati con EPS, XPS, PE e lana minerale dotata di barriera al vapore – qualora non sia posta in essere un'adeguata protezione contro la pioggia mediante applicazione di trattamento/strato esterno idrorepellente – come raccomandato dalle linee guida WTA. Tale problema si traduce in un aumento cronico del contenuto d'acqua nell'intera chiusura, di modo tale che risulta impossibile fare previsioni sul comportamento igrotermico della soluzione tecnica nel lungo periodo. È questo il caso della muratura in calcestruzzo, nella quale si riscontra sempre questo fenomeno. Esso è molto marcato nella zona C2, in cui si nota anche un aumento del valore di trasmittanza della chiusura. Il medesimo problema si registra anche nelle murature in mattoni, sia pieni sia forati, e nella muratura in tufo, qui non solo nella zona C2 ma anche in C1. Nelle varianti con lana minerale, inoltre, l'accumulo di umidità nello strato isolante comporta un aumento della conducibilità termica, determinando così un decadimento delle prestazioni energetiche di tutta la soluzione tecnica.

Le conclusioni cui si è approdati in questa tesi riguardano, come puntualizzato in precedenza, l'analisi igrotermica dinamica di sole chiusure verticali – peraltro limitate a sette casi rappresentativi del contesto edilizio italiano. In futuro, pertanto, si potrebbe sviluppare uno studio analogo per altre categorie di soluzioni tecniche, come ad esempio le coperture, ampliando ulteriormente anche la casistica dei materiali disponibili.

Allo stesso modo sarebbe auspicabile un aumento dei dati climatici per l'Italia, creando nuovi file climatici per altre località italiane. La maggiore difficoltà, a questo proposito, riguarda la reperibilità e accessibilità dei dati di pioggia e direzione del vento. Molte sono infatti le stazioni climatiche nel nostro Paese, ma solo alcune forniscono i suddetti dati. La stessa UNI 10349, attuale riferimento per i dati climatici in Italia ai fini dei calcoli energetici, pur fornendo per ogni provincia dati orari di temperatura, umidità relativa, velocità del vento e radiazione solare, sorvola sui due restanti parametri. Tanto più lodevole risulta allora l'iniziativa del MIPAAF che, a partire dal 2014, mette a disposizione anche i dati misurati di pioggia e direzione del vento per molte località italiane. Si tratta però di dati grezzi, che è necessario controllare ed eventualmente correggere e integrare.

Infine, un'ultima annotazione riguarda le condizioni climatiche interne. In questa tesi esse sono, come spiegato in precedenza, mutate dal modello indicato dalla UNI EN 15026. Esse si sono rivelate non problematiche per le chiusure simulate, con particolare riferimento al rischio muffa. Sarebbe pertanto interessante eseguire simulazioni analoghe variando le condizioni interne, applicando ad esempio il modello proposto dalla UNI EN ISO 13788 o altri ancora, eventualmente derivati da monitoraggi di casi reali.

Nonostante dette limitazioni, si spera che questo lavoro di tesi possa rappresentare un utile strumento per tutti coloro che si avvicinano per la prima volta all'analisi igrotermica di soluzioni tecniche nel clima italiano per mezzo delle simulazioni dinamiche.

Bibliografia

- [1] E. LUCCHI, V. PRECCHI, *Efficienza energetica e patrimonio costruito: la sfida al miglioramento delle prestazioni dell'edilizia storica*. Maggioli Editore, p. 336, Milano 2013.
- [2] Direttiva 2010/31/UE del Parlamento e del Consiglio Europeo del 19 maggio 2010, *Prestazione energetica nell'edilizia*.
- [3] C. BENEDETTI, P. ERLACHER, M. BARATIERI, *Risanare l'esistente: Soluzioni per il comfort e l'efficienza energetica*. bu,press, Bolzano 2011.
- [4] M. KRUS, K. SEDLBAUER, H.M. KÜNZEL, *Innendämmung aus bauphysikalischer Sicht*. Presentazione dell'evento "Innendämmung – eine Bauphysikalische Herausforderung".Münster, 2005.
- [5] H.M. KÜNZEL, *Energetische Altbausanierung durch Innendämmung*. WTA-Journal, 4 (2004), pp. 361-374, Pfaffenhofen 2004.
- [6] S. LOMBARDI, *Umidità nelle murature: diagnosi e recupero*. Tesi di Dottorato, p. 685, Università degli Studi di Napoli, Napoli 2005.
- [7] NORMAL 1/88, *Alterazioni Macroscopiche dei Materiali Lapidei*.
- [8] Decreto Ministeriale 26/06/2015, *Applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e definizione delle prescrizioni e dei requisiti minimi degli edifici*.
- [9] Decreto del Presidente della Repubblica 26/8/1993 n. 412, *Regolamento recante norme per la progettazione, l'installazione, l'esercizio e la manutenzione degli impianti termici degli edifici al fin del contenimento dei consumi di energia, in attuazione dell' art. 4, comma 4, della Legge 10/1991*.
- [10] UNI EN ISO 13788:2013, *Prestazione igrotermica dei componenti e degli elementi per l'edilizia – Temperatura superficiale interna per evitare l'umidità superficiale critica e condensazione interstiziale – Metodi di calcolo*.
- [11] Decreto del Presidente della Repubblica 2/4/2009 n. 59, *Regolamento di attuazione dell'art. 4, comma 1, lettera a) e b), del decreto legislativo 19/08/2005, n. 192, concernente attuazione della direttiva 2002/91/CE sul rendimento energetico in edilizia*.
- [12] Decreto Legislativo 19/08/2005 n. 192, *Attuazione della direttiva 2002/91/CE sul rendimento energetico in edilizia*.
- [13] Decreto Legislativo 29/12/2006 n. 311, *Disposizioni correttive e integrative al decreto legislativo 19/8/2005 n. 192, recante attuazione della direttiva 2002/91/CE, relativa al rendimento energetico nell'edilizia*.

- [14] DIN 4108-3:2014-11, *Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 3: Klimabedingter Feuchteschutz – Anforderungen, Berechnungsverfahren und Hinweise für Planung und Ausführung*. 2014.
- [15] BS 5250: 2011, *Code of practice for control of condensation in buildings*.
- [16] UNI EN ISO 15026:2008, *Valutazione del trasferimento di umidità mediante una simulazione numerica*.
- [17] UNI 10349:2016, *Riscaldamento e raffrescamento degli edifici – Dati climatici*.
- [18] UNI EN ISO 13788:2003, *Prestazione igrotermica dei componenti e degli elementi per l'edilizia – Temperatura superficiale interna per evitare l'umidità superficiale critica e condensazione interstiziale – Metodi di calcolo*.
- [19] V. RAISA, R. ZECCHIN, *Muffe negli alloggi: perché si presentano, come evitarle, come gestire i contenziosi*. Quaderni di legislazione tecnica, p. 8.
- [20] E. MARRA, *Le simulazioni termiche dinamiche: possibili applicazioni nella pratica edilizia*. Neo-Eubios, p. 55, 13, Milano 2016.
- [21] AA.VV., *DM 26/06/2015: assenza di condensazione? Dalla UNI EN ISO 13788 alla UNI EN 15026*. www.anit.it, p. 2, 24 febbraio 2016.
- [22] ASHRAE, *Handbook of Fundamentals, Criteria for Moisture-Control Design Analysis in Buildings*. Chapter 23, 2009.
- [23] R. ESPOSTI, G. GALBUSERA, A. PANZERI, C. SALANI, *Muffa, condensa e ponti termici*. Da: "L'isolamento termico e acustico", vol. 4, ANIT, Milano 2014.
- [24] UNI 10349:1994, *Riscaldamento e raffrescamento degli edifici – Dati climatici*
- [25] WTA Merkblatt 6-5-14/D, *Innendämmung nach WTA II: Nachweis von Innendämmsystemen mittels numerischer Berechnungsverfahren*. Stand April 2014 Hrsg. Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V. WTA, Referat 6 Bauphysik, Monaco 2014.
- [26] DIN 68800:2011, *Holzschutz*, 2011.
- [27] WTA Merkblatt 6.8, *Feuchtetechnische Bewertung von Holzbauteilen-Vereinfachte Nachweise und Simulation* Referat 6 Bauphysik WTA Merkblatt E 6-8-15/D, Stand September 2015 Hrsg. Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V. WTA, Referat 6 Bauphysik, Monaco 2015.
- [28] DIN 18550-1:2014 *Design, preparation and application of external rendering and internal plastering - Part 1: Supplementary provisions for DIN EN 13914-1 for external rendering*.
- [29] H.M. KÜNZEL, *Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components*. Tesi di Dottorato, Fraunhofer IRB, p. 60, Stoccarda 1995.

- [30] BS EN 1602: 2013 Thermal insulating products for building applications. Determination of the apparent density.
- [31] DIN EN 1015-10:2007-05 Methods of tests for mortars for masonry- Part 10: determination of dry bulk density of hardened mortar.
- [32] BS EN 772-4:1998 Methods of test for masonry units. Determination of real and bulk density and of total and open porosity for natural stone masonry units.
- [33] DIN EN 12524:2000-07 Building materials and products- Hygrothermal properties- Tabulated design values.
- [34] DIN 52612-1:1979-09, *Testing of Thermal Insulating Materials; Determination of Thermal Conductivity by the Guarded Hot Plate Apparatus; Test Procedure and Evaluation.*
- [35] UNI EN 12664:2002, *Prestazione termica dei materiali e dei prodotti per edilizia. Determinazione della resistenza termica con il metodo della piastra calda con anello di guardia e con il metodo del termo-flussimetro. Prodotti secchi e umidi con media e bassa resistenza termica.*
- [36] DIN EN ISO 12571:2013-12 Hygrothermal performance of buildings materials. Determination of hygroscopic sorption properties.
- [37] M. KRUS, *Moisture Transport and Storage Coefficients of Porous Mineral Building Materials. Theoretical Principles and New Test Methods.* Fraunhofer IRB-Verlag, p. 10, Stoccarda 1996.
- [38] EN ISO 15148:2002 Hygrothermal performance of building materials and products – Determination of water absorption coefficient by partial immersion.
- [39] Legge 30/4/1976 n. 373, *Norme per il contenimento del consumo energetico per usi termici negli edifici.*
- [40] Legge 9/1/1991 n. 10, *Norme per l'attuazione del piano energetico nazionale in materia di uso razionale dell'energia, di risparmio energetico e di sviluppo delle fonti rinnovabili di energia.*
- [41] UNI/TR 11552:2014, *Abaco delle strutture costituenti l'involucro opaco degli edifici e parametri termo-fisici.*
- [42] UNI/TS 11300-1:2008, *Prestazioni energetiche degli edifici – Parte 1: Determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale.*
- [43] UNI 10351:2015, *Materiali e prodotti per edilizia - Proprietà termo-igrometriche – Procedura per la scelta dei valori di progetto.*
- [44] Ministero per i Beni Culturali e Ambientali, *Bollettino d'arte.* Supplemento 216, Istituto Poligrafico e Zecca dello Stato, Libreria dello Stato, Roma 1984.

- [45] B. DANIOTTI, R. PAOLINI, F. RE CECCONI, Effects of Ageing and Moisture on Thermal Performance of ETICS Cladding. In: V.P. de Freitas, J.M.P.Q. Delgado. editors. *Durability of Building Materials and Components*. Springer Verlag, 2013, pp.127-171.
- [46] AA.VV., *Il mercato dei materiali isolanti: tecnologie per l'isolamento termico, tipologie di materiali, normativa e incentivazione*. Rapporto ANIT, Milano 2013.
- [47] W. HOLZAPFEL, *Werkstoffkunde für Dach-, Wand- und Abdichtungs-technik*. Rudolf Müller Verlag, p. 342, Colonia 2003.
- [48] E. CARATTIN, M. FRANZ, S. LUCIANO, *Materiali isolanti: nuove tendenze in architettura*. Artec IUAV, 67, Venezia.
- [49] M. KRUS, T. WERNER, T. GROßKINSKY, G. GEORGIEV, *A new load-bearing insulation material made of cattail*. First International Conference on Bio-based Building materials, 8, Clermont-Ferrand (Francia) 2015.
- [50] AA.VV., *New Building Material for Environmentally Compatible and Structural Retrofitting in Monument Preservation*. Progetto di Supporto per "Deutsche Stiftung Umwelt" AZ 27918, 62, Fraunhofer IBP, Valley.
- [51] ASHRAE Standing Standard Project Committee 160 (SSPC 160), *Criteria for Moisture-Control Design Analysis in Buildings for USA*.
- [52] UNI EN ISO 6946:2008, *Componenti ed elementi per edilizia – Resistenza termica e trasmittanza termica*.
- [53] ASHRAE ANSI Standard 160, *Criteria for Moisture-Control Design Analysis in Buildings*. USA 2009.
- [54] WTA-Merkblatt 6-2 (12.2014/D), *Simulation wärme- und feuchte-technischer Prozesse (Simulation of Heat and Moisture Transfer)*. Fraunhofer IRB-Verlag, 2014.
- [55] AA.VV., *Andamento meteo-climatico in Italia*. Rapporto Istat, 2009.
- [56] AA.VV., *Atlante Climatico d'Italia*. Centro Nazionale di Meteorologia e Climatologia Aeronautica, Aeronautica Militare.

Appendice

I contenuti di questa appendice sono consultabili sul CD allegato alla tesi e applicato sulla terza di copertina.