

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea in Architettura per il Progetto Sostenibile

Tesi di Laurea Magistrale

A.A. 2019/2020



**CARATTERIZZAZIONE DELLE PROPRIETA' TERMOIGROMETRICHE E
SIMULAZIONE DELLE PRESTAZIONI DI INTONACI ISOLANTI**

Relatore

Prof. ssa Valentina Serra

Candidata

Costanza Brocato S250166

Co-relatore

Arch. Stefano Fantucci

Co-relatore

Dott.ssa Elisa Fenoglio

Sommario

I	INDICE DELLE FIGURE	V
II	INDICE DELLE TABELLE	VI
III	INDICE DEI GRAFICI	VII
IV	INDICE DEI SIMBOLI UTILIZZATI	VIII
V	INDICE DEGLI ACRONIMI	IX
VI	GRAFICA DEI RIFERIMENTI	X
1.	INTRODUZIONE	1
2.	L'INVOLUCRO EDILIZIO	5
2.1.	INTONACO.....	6
2.1.1.	LEGANTI.....	7
2.1.1.1.	GESSO	7
2.1.1.2.	CALCE	7
2.1.1.3.	CEMENTO	7
2.1.1.4.	ARGILLA	8
2.1.1.5.	RESINE	8
2.1.2.	AGGREGATI	8
2.1.3.	ADDITIVI.....	8
2.1.4.	APPLICAZIONE	8
3.	TERMOINTONACI	10
3.1.	AGGREGATI MINERALI.....	11
3.1.1.	PERLITE	11
3.1.2.	POMICE	11
3.1.3.	VERMICULITE	12
3.1.4.	ARGILLA ESPANSA	12
3.1.5.	DIATOMITE	12
3.1.6.	ALTRI AGGREGATI MINERALI	13
3.2.	AGGREGATI VEGETALI	13
3.2.1.	SUGHERO	13
3.2.2.	LEGNO	14
3.2.3.	CANAPA	14
3.2.4.	PALMA DA DATTERO	15
3.2.5.	GUSCI DI MANDORLE	15
3.2.6.	ALTRI AGGREGATI VEGETALI	15
3.3.	AGGREGATI ARTIFICIALI.....	16
3.3.1.	POLIURETANO	16

3.3.2.	<i>POLISTIRENE ESPANSO</i>	17
3.3.3.	<i>POLIETILENE TEREFTALATO</i>	17
3.3.4.	<i>CELLULOSA</i>	18
3.3.5.	<i>ALTRI MATERIALI ARTIFICIALI</i>	18
3.4.	<i>PCM</i>	20
3.4.1.	<i>USO IN EDILIZIA</i>	21
3.4.1.1.	<i>USO COME AGGREGATO NEI TERMOINTONACI</i>	22
3.5.	<i>AEROGEL</i>	23
3.5.1.	<i>USO IN EDILIZIA</i>	24
3.5.1.1.	<i>USO COME AGGREGATO NEI TERMOINTONACI</i>	25
3.6.	<i>ANALISI DI MERCATO</i>	28
3.6.1.	<i>CONCLUSIONI</i>	30
4.	<i>ANALISI SPERIMENTALE</i>	31
4.1.	<i>PROVE DI LABORATORIO</i>	34
4.1.1.	<i>DETERMINAZIONE DEL CONTENUTO DI UMIDITÀ TRAMITE ESSICCAZIONE A ELEVATE TEMPERATURE</i>	34
4.1.1.1.	<i>TEST</i>	34
4.1.1.2.	<i>RISULTATI E COMMENTI</i>	35
4.1.2.	<i>MISURA DELLA CONDUTTIVITÀ TERMICA</i>	37
4.1.2.1.	<i>TEST</i>	37
4.1.2.2.	<i>RISULTATI E COMMENTI</i>	38
4.1.3.	<i>MISURA DEL CALORE SPECIFICO</i>	44
4.1.3.1.	<i>TEST</i>	44
4.1.3.2.	<i>RISULTATI E COMMENTI</i>	45
4.1.4.	<i>MISURA DEL COEFFICIENTE DI ASSORBIMENTO IGROSCOPICO</i>	47
4.1.4.1.	<i>TEST</i>	47
4.1.4.2.	<i>RISULTATI E COMMENTI</i>	48
4.1.5.	<i>MISURA DEL COEFFICIENTE DI PERMEABILITÀ AL VAPORE ACQUEO</i>	52
4.1.5.1.	<i>TEST</i>	52
4.1.5.2.	<i>RISULTATI E COMMENTI</i>	53
4.1.6.	<i>ASSORBIMENTO D'ACQUA PER CAPILLARITÀ</i>	56
4.1.6.1.	<i>TEST</i>	56
4.1.6.2.	<i>RISULTATI E COMMENTI</i>	57
4.1.7.	<i>SCHEDE TECNICHE</i>	59
5.	<i>ANALISI NUMERICA</i>	61
5.1.	<i>CASO STUDIO 1: INVOLUCRO IN MATTONI PIENI</i>	63
5.2.	<i>CASO STUDIO 2: INVOLUCRO IN MATTONI CON INTERCAPEDINE D'ARIA</i>	63
5.3.	<i>CASO STUDIO 3: INVOLUCRO IN PIETRA</i>	64
5.4.	<i>CALCOLO IN REGIME STAZIONARIO</i>	65

5.4.1.	UNI EN ISO 6949	65
5.5.	WUFI PRO.....	67
5.5.1.	CALCOLO IN REGIME DINAMICO	67
5.5.2.	STRATIGRAFIE E MATERIALI	68
5.5.3.	ORIENTAMENTO, INCLINAZIONE, ESPOSIZIONE ALLA PIOGGIA, VENTO	69
5.5.4.	PERIODO DI CALCOLO, TIME STEP	69
5.5.5.	DATI CLIMATICI.....	69
5.5.5.1.	TORINO	69
5.5.5.2.	CATANIA.....	70
5.5.5.3.	MONFERO	70
5.5.6.	CONDIZIONI INTERNE.....	71
5.6.	RISULTATI E ANALISI DELLE SIMULAZIONI	72
5.6.1.	IL CONTENUTO D'ACQUA.....	72
5.6.2.	LA VARIAZIONE DI CONDUTTIVITÀ DEI TERMOINTONACI	77
5.6.2.1.	L'INFLUENZA DELLA BASE MURARIA	78
5.6.2.2.	L'INFLUENZA DELLA ZONA CLIMATICA	80
5.6.3.	LA VARIAZIONE DI TRASMITTANZA DELLA PARETE	82
5.6.3.1.	L'INFLUENZA DELLA BASE MURARIA	83
5.6.3.2.	L'INFLUENZA DELLA ZONA CLIMATICA	86
5.6.4.	RISCHIO DI CONDENSA E CRESCITA DI MUFFE	88
6.	CONCLUSIONI	90
7.	RINGRAZIAMENTI	92
8.	SCHEDE TECNICHE DEGLI INTONACI SIMULATI.....	93
9.	CASI STUDIO	105
9.1.	STRATIGRAFIA GRANITE.....	105
9.2.	STRATIGRAFIA INTERCAPEDINE	107
9.3.	STRATIGRAFIA MATTONI	111
10.	RISULTATI DELLE SIMULAZIONI	115
10.1.	CORK001_GRANITE	116
10.2.	CORK001_INTERCAPEDINE	117
10.3.	CORK001_MATTONI	118
10.4.	INT490_GRANITE	119
10.5.	INT490_INTERCAPEDINE.....	120
10.6.	INT490_MATTONI.....	121
10.7.	PCM26_GRANITE.....	122
10.8.	PCM26_INTERCAPEDINE.....	123
10.9.	PCM26_MATTONI	124

10.10. THERMOCALCE_GRANITE	125
10.11. THERMOCALCE_INTERCAPEDINE	126
10.12. THERMOCALCE_MATTONI	127
10.13. THERMOCALCE014_GRANITE	128
10.14. THERMOCALCE014_INTERCAPEDINE	129
10.15. THERMOCALCE014_MATTONI	130
10.16. THERMOINTONACO_GRANITE.....	131
10.17. THERMOINTONACO_INTERCAPEDINE.....	132
10.18. THERMOINTONACO_MATTONI	133
10.19. VGT001_GRANITE.....	134
10.20. VGT001_INTERCAPEDINE	135
10.21. VGT001_MATTONI	136
11. BIBLIOGRAFIA.....	138

I - Indice delle figure

FIGURA 1	FABISOGNO ENERGETICO PER IL RISCALDAMENTO, ESPRESSO IN $\text{kWh/m}^2\text{A}$ RELATIVO A UN EDIFICIO RESIDENZIALE TIPO, SITUATO IN ALTO ADIGE. (FONTE: ASTAT 2002- RIELABORAZIONE GRAFICA)	2
FIGURA 2	LAYERS CHE COMPONGONO GLI INTONACI (RIELABORAZIONE GRAFICA)	9
FIGURA 3	CLASSIFICAZIONE PCM (RIELABORAZIONE GRAFICA)	21
FIGURA 7: CAMERA CLIMATICA		34
FIGURA 4: CAMPIONE PER LA MISURA DELLA CONDUTTIVITÀ TERMICA		37
FIGURA 6	PREPARAZIONE DEI CAMPIONI PER IL TEST DI CALORE SPECIFICO E CONDUTTIVITÀ TERMICA	44
FIGURA 7: HEAT FLUX METER []		44
FIGURA 8	CAMPIONE PER IL TEST DI ASSORBIMENTO IGROSCOPICO [102]	47
FIGURA 9	CAMERA CLIMATICA CON I CAMPIONI IN MISURA [102]	47
FIGURA 10: PREPARAZIONE DEI PROVINI PER ESEGUIRE IL TEST DI PERMEABILITÀ AL VAPORE ACQUEO [102]		52
FIGURA 11	FOTOGRAFIA CASO STUDIO 1 (FONTE V. NOTA 123)	63
FIGURA 12	STRATIGRAFIA INVOLUCRO IN MATTONI PIENI (RIELABORAZIONE GRAFICA)	63
FIGURA 13	DATI CLIMATICI DI TORINO SU WUFI PRO	70
FIGURA 14	DATI CLIMATICI DI CATANIA SU WUFI PRO	70
FIGURA 15	DATI CLIMATICI DI MONFERO SU WUFI PRO	71

II - Indice delle tabelle

TABELLA 1	RIASSUNTO TERMOINTONACI CON AGGREGATI MINERALI	13
TABELLA 2	RIASSUNTO TERMOINTONACI CON AGGREGATI VEGETALI	16
TABELLA 3	RIASSUNTO TERMOINTONACI CON AGGREGATI ARTIFICIALI	19
TABELLA 4	RIASSUNTO TERMOINTONACI CON PCM	22
TABELLA 5	TERMOINTONACI CON AEROGEL	27
TABELLA 6	SPECIFICHE MALTE DA INTONACO SECONDO LA UNI 998-1:2016 (RIELABORAZIONE GRAFICA)	31
TABELLA 7	TERMOINTONACI ANALIZZATI	32
TABELLA 8	CALORE SPECIFICO DEI MATERIALI ANALIZZATI	45
TABELLA 9	COEFFICIENTE DI ASSORBIMENTO D'ACQUA PER CAPILLARITÀ DEI CAMPIONI ANALIZZATI	57
TABELLA 10	ELENCO DELLE COMBINAZIONI DI CALCOLO	62
TABELLA 11	DATI GEOMETRICI E TERMOFISICI DELLA STRATIGRAFIA IN MATTONI PIENI.....	63
TABELLA 12	DATI GEOMETRICI E TERMOFISICI DELLA STRATIGRAFIA DEL MURO CON INTERCAPEDINE D'ARIA.....	64
TABELLA 13	DATI GEOMETRICI E TERMOFISICI DELLA STRATIGRAFIA DEL MURO IN PIETRA	65
TABELLA 14	TRASMITTANZA TERMICA IN REGIME STAZIONARIO DELLE CONFIGURAZIONI ANALIZZATE	66
TABELLA 15	TRASMISSIONE DI MATERIA ENERGIA IN REGIME DINAMICO (RIELABORAZIONE GRAFICA).....	68
TABELLA 16	VERIFICA ASSENZA DI CONDENSA E MUFFE	89

III - Indice dei grafici

GRAFICO 1	IMPIEGHI FINALI DI ENERGIA (%) IN ITALIA PER SETTORE, RIFERITI ALL'ANNO 2018 (FONTE ENEA 2018 – RIELABORAZIONE GRAFICA)	1
GRAFICO 2	PRINCIPALI CAUSE DELLE DISPERSIONI TERMICHE NEGLI EDIFICI (FONTE UNIVERSITÀ IUAV – RIELABORAZIONE GRAFICA).....	5
GRAFICO 3	ENERGIA SPECIFICA IN KJ/KG: ENERGIA CONTENUTA IN 1 KG DI MATERIA [71] (RIELABORAZIONE GRAFICA)	20
GRAFICO 4	CONDUTTIVITÀ TERMICA IN FUNZIONE DEL CONTENUTO DI AEROGEL.....	26
GRAFICO 5	NUMERO DI TERMOINTONACI PRESENTI NEL MERCATO EUROPEO E TENDENZA PER I PROSSIMI ANNI.....	29
GRAFICO 6	INTONACI ISOLANTI PRESENTI SUL MERCATO SUDDIVISI IN BASE LA TIPOLOGIA DI AGGREGATO [115] (RIELABORAZIONE GRAFICA)	29
GRAFICO 7	DENSITÀ A SECCO DEI MATERIALI ANALIZZATI	36
GRAFICO 8	CONDUTTIVITÀ TERMICA A SECCO DEI CAMPIONI ANALIZZATI	41
GRAFICO 9	CONDUTTIVITÀ TERMICA DEI CAMPIONI BAGNATI E CONTENUTO D'ACQUA	43
GRAFICO 10	CURVE DI ASSORBIMENTO DELL'UMIDITÀ DEI MATERIALI ANALIZZATI CONTENENTI AGGREGATI TRADIZIONALI	50
GRAFICO 11	CURVE DI ASSORBIMENTO DELL'UMIDITÀ DEI MATERIALI ANALIZZATI CONTENENTI AEROGEL.....	51
GRAFICO 12	COEFFICIENTE DI PERMEABILITÀ AL VAPORE μ DEI MATERIALI ANALIZZATI	55
GRAFICO 13	RISULTATI NELLA STRATIGRAFIA GRANITE: CONTENUTO D'ACQUA MASSIMO E MINIMO NEI MESI INVERNALI.....	74
GRAFICO 14	RISULTATI NELLA STRATIGRAFIA INTERCAPEDINE: CONTENUTO D'ACQUA MASSIMO E MINIMO NEI MESI INVERNALI	75
GRAFICO 15	RISULTATI NELLA STRATIGRAFIA MATTONI: CONTENUTO D'ACQUA MASSIMO E MINIMO NEI MESI INVERNALI	76
GRAFICO 16	RISULTATI NELLA STRATIGRAFIA GRANITE: VARIAZIONE DI CONDUTTIVITÀ NEGLI ISOLANTI	79
GRAFICO 17	RISULTATI NELLA STRATIGRAFIA INTERCAPEDINE: VARIAZIONE DI CONDUTTIVITÀ NEGLI ISOLANTI	79
GRAFICO 18	RISULTATI NELLA STRATIGRAFIA MATTONI: VARIAZIONE DI CONDUTTIVITÀ NEGLI ISOLANTI	80
GRAFICO 19	RISULTATI A TORINO: VARIAZIONE DI CONDUTTIVITÀ NEGLI ISOLANTI	81
GRAFICO 20	RISULTATI A CATANIA: VARIAZIONE DI CONDUTTIVITÀ NEGLI ISOLANTI	81
GRAFICO 21	RISULTATI A MONFERO: VARIAZIONE DI CONDUTTIVITÀ NEGLI ISOLANTI.....	82
GRAFICO 22	RISULTATI NELLA STRATIGRAFIA GRANITE: VARIAZIONE DI TRASMITTANZA	84
GRAFICO 23	RISULTATI NELLA STRATIGRAFIA INTERCAPEDINE: VARIAZIONE DI TRASMITTANZA	85
GRAFICO 24	RISULTATI NELLA STRATIGRAFIA MATTONI: VARIAZIONE DI TRASMITTANZA.....	85
GRAFICO 25	RISULTATI A TORINO: VARIAZIONE DI TRASMITTANZA.....	87
GRAFICO 26	RISULTATI A CATANIA: VARIAZIONE DI TRASMITTANZA	87
GRAFICO 27	RISULTATI A MONFERO: VARIAZIONE DI TRASMITTANZA	87

IV - Indice dei simboli utilizzati

Simbolo	Quantità	Unità di misura
A	Area del campione	m ²
a	Diffusività termica	m ² · s ⁻¹
c	Calore specifico	J / kg · K
C	Assorbimento d'acqua per capillarità	kg / m ²
d	Spessore del provino	m
D _w	Diffusività termica	m ² / s
GG	Gradi giorno	-
G	Portata del vapore acqueo attraverso il provino	kg / s
H	Entalpia	J / m ³
h _e	Coefficiente liminare esterno	W / m ² · K
h _i	Coefficiente liminare interno	W / m ² · K
m	Massa del campione	kg
m ₀	Massa del campione secco	kg
T	Temperatura	C°
w	Contenuto di umidità, massa in volume	kg / m ³
W	Permeanza al vapore acqueo	kg/s · m ² · Pa
p	Pressione	Pa
R	Resistenza termica	m ² · K / W
u	Contenuto di umidità, massa in massa	kg / kg
UR	Umidità relativa	%
V	Volume del campione	m ³
δ _p	Permeabilità al vapore	kg / m · s · Pa
λ	Conducibilità termica	W / m · K
ρ	Densità del materiale	kg / m ³
ρ ₀	Densità del materiale secco	kg / m ³
μ	Coefficiente di resistenza alla diffusione del vapore	-
φ	Umidità relativa	-
ψ	Contenuto di umidità, volume in volume	m ³ / m ³
ε	Effusività termica	W · s ^{1/2} m ⁻² K ⁻¹

V - Indice degli acronimi

Acronimo	Spiegazione
EPS	Expanded Polystyrene Polistirene Espanso
EPSC	Expanded Polystyrene Package Crumbs
GRP	Glass Reinforced Plastic: fibre di vetro in resina (poliestere)
HFM	Heat Flux Meter - Termoflussimetro
LWA	LightWeight Aggregate: aggregati leggeri
NEOPOR®	Marchio BASF: EPS con particelle di grafite
PET	Polietilene Tereftalato
PUR	Poluretano
REC	Regranulated of Expanded Cork
WW	Wooden Waste: scarti del legno

VI - Grafica dei riferimenti

Materiali con aggregati vegetali	
Materiali con aggregati polimerici	
Materiali con aggregato argilla espansa	
Materiali con aggregati minerali	
Materiali con aggregato perlite	
Materiali con aggregati PCM	
Materiali con aggregato aerogel	
Materiali con aggregato aerogel e perlite	
Materiali con aggregato aerogel e altri	
Torino	
Catania	
Monfero	
Involucro in granite	
Involucro con intercapedine	
Involucro in mattoni	

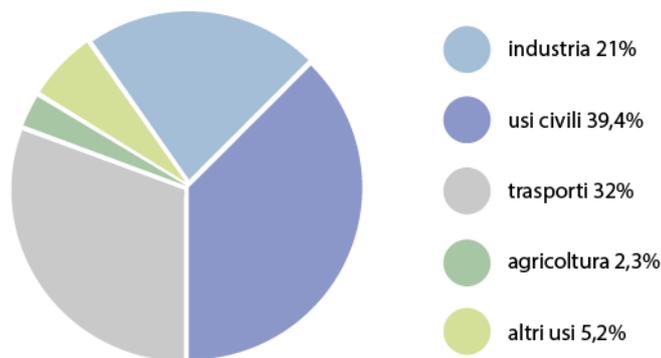
1. INTRODUZIONE

Tema centrale dei dibattiti e delle politiche mondiali degli ultimi anni, è quello energetico: l'aumento della popolazione e quindi l'aumento dei consumi e della richiesta di energia sono diventati uno dei principali problemi della nostra società.

E' stato stimato che in Europa circa il 40% dell'energia utilizzata è impiegata nel settore edilizio e che il 36% delle emissioni di CO2 sia dovuta alla climatizzazione degli edifici [1].

Questo perché il 35% dell'intero patrimonio edilizio europeo è stato costruito più di 50 anni fa e quindi risulta inadeguato e inefficiente dal punto di vista energetico [2].

Grafico 1 Impieghi finali di energia (%) in Italia per settore, riferiti all'anno 2018 (Fonte ENEA 2018 – Rielaborazione grafica)



Per indirizzare la crescita mondiale verso un'ottica più ecocompatibile è stata formulata la "Agenda 2030" che raccoglie i "17 Obiettivi per lo Sviluppo Sostenibile". Ognuno con un target specifico ma strettamente connessi tra loro, gli obiettivi sono una guida che ogni nazione è tenuta a seguire per arrivare ad uno sviluppo economico e sociale adeguato [3].

Tra gli obiettivi climatici ed energetici proposti per il 2030 dall'Unione Europea spiccano:

- La riduzione di almeno il 40% delle emissioni di gas a effetto serra
- Un miglioramento dell'efficienza energetica del 33%
- Che almeno il 32% dell'energia provenga da fonti rinnovabili

Inoltre la Direttiva 2018/844 del Parlamento Europeo del 30 maggio esplicita che gli sforzi tesi ad accrescere le prestazioni energetiche nell'edilizia contribuirebbero attivamente all'indipendenza energetica dell'Unione creando una sostanziosa crescita occupazionale [4]. Devono quindi essere promosse delle strategie di ristrutturazione a lungo termine ed è fondamentale sperimentare nuove soluzioni in grado di migliorare le prestazioni energetiche di edifici e siti storici per garantirne al tempo stesso, la conservazione e la valorizzazione.

In Italia la situazione è ancora più delicata: si conta che 2 edifici su 10 sono stati realizzati prima del 1918 e ben il 65% prima del 1976 [5], anno in cui furono proposte e attuate le prime leggi sul risparmio energetico. Questa legge, del 30 marzo 1976 fu abrogata per l'introduzione della legge

10 del 1991 che regolamentava i consumi di energia negli edifici pubblici e privati, l'esercizio e la manutenzione degli impianti e forniva indicazioni nel caso di recupero del patrimonio edilizio esistente [6]. Nel 2005 venne adottata la Direttiva 2002/91/CE riguardante i diversi tipi di interventi per l'efficientamento energetico, direttiva che negli anni subì modifiche e integrazioni con leggi specifiche volte al risparmio energetico negli edifici.

Ad oggi è in vigore il Decreto del Ministero dello Sviluppo Economico del 26 giugno 2015 che fissa i valori dei parametri caratteristici (come ad esempio la trasmittanza termica) degli elementi edilizi e degli impianti, sia per edifici di nuova costruzione sia per interventi di ristrutturazione [7].

Figura 1 Fabisogno energetico per il riscaldamento, espresso in kWh/m²a relativo a un edificio residenziale tipo, situato in Alto Adige. (Fonte: Astat 2002- Rielaborazione grafica)



L'Italia oltre a vantare il maggior numero di siti dichiarati "patrimonio dell'umanità" è ricca di aree di particolare pregio culturale e si stima che quasi la metà del territorio nazionale, il 46,8%, sia sottoposto a vincolo di tutela [8]. Molti degli edifici che ricoprono la nostra penisola hanno un importante valore storico e/o architettonico, un gran numero di essi però presenta situazioni di rischio: logoramento o addirittura perdita del manufatto stesso [9].

Questi beni sono stati censiti nella "Carta del rischio del patrimonio culturale" e nel 2012 sono stati stimati essere più di 100 mila i palazzi, musei, siti archeologici, ecc.. da attenzionare [10].

Proprio per questi motivi compito dell'architetto, più di qualunque altra figura professionale nel campo dell'edilizia, dovrebbe essere quello di mediare le scelte tecniche con quelle artistiche e di indicare come e dove intervenire su edifici che più che abitazioni o uffici, sono opere d'arte.

Il termine sostenibilità accostato alle tematiche dell'architettura significa proprio questo: ogni progetto che metta in gioco scelte formali, tecniche ed economiche, deve essere in grado di garantire qualità e valorizzazione in accordo con la storia del manufatto. E' proprio il corso di laurea in architettura per la sostenibilità che permette di formare professionisti in grado di rispondere alle diverse esigenze della moderna progettazione.

Capire dove intervenire e come diventa il punto cruciale del dibattito energetico, architettonico e culturale: a seconda del tipo di vincolo, che sia storico, artistico ecc.. vi sono diverse prescrizioni da rispettare, comunque vige su questi edifici il divieto di modifica dello stato dei luoghi, ciò significa che è vietato modificare a livello planimetrico, in facciata o internamente un edificio. Risulta evidente che gli edifici più datati richiedono un maggior impiego di risorse sia per essere utilizzati sia per garantire agli utenti il confort termo-igrometrico adeguato.

Le cause delle dispersioni termiche negli edifici sono dovute a numerosi fattori, si stima che ad influire maggiormente siano le strutture di copertura, a cui si deve dal 10 al 25% delle dispersioni, le strutture verticali trasparenti cioè gli infissi dal 16 al 25% [11] e le strutture verticali opache, cioè le pareti esterne che possono influire più del 30% sul bilancio energetico di un edificio.

Nel caso di edifici storici le dispersioni termiche sono dovute principalmente al mancante isolamento delle strutture verticali opache e quindi intervenire in questi siti diventa estremamente complicato poiché è improbabile utilizzare le tradizionali tecniche di isolamento. Risulta molto difficile applicare un isolamento a cappotto esterno in quanto il coibente deve essere posato su una superficie complanare, priva di degradi o umidità, e chiaramente su un supporto con un'adeguata resistenza meccanica. La maggior parte delle volte però risulta impossibile utilizzare questa tecnica poiché aggiungendo l'isolamento si andrebbe a modificare la conformazione originale esterna del manufatto. Questa risulta comunque la scelta più performante e quindi più seguita nel caso di edifici di nuova realizzazione in quanto elimina la presenza di ponti termici e permette di sfruttare al meglio l'inerzia termica della massa muraria. L'isolamento interno, scelta più comune in caso di ristrutturazioni, non è adeguato per gli edifici storici se sono presenti decorazioni o finiture pregiate internamente. Questa scelta, quando utilizzabile, comporta una riduzione della superficie utile delle stanze e, se dovesse avere delle zone di discontinuità queste diventerebbero certamente dei punti freddi in cui è facile si formi condensa superficiale, interstiziale o muffe. C'è da considerare inoltre che l'isolamento dall'interno riduce la capacità di inerzia termica delle pareti: l'isolante non trattiene il calore come fa una muratura tradizionale in quanto l'assenza di massa non permette l'accumulo termico.

Ad oggi il mercato mette a disposizione un'ampia gamma di prodotti isolanti: di origine vegetale come sughero, fibre di legno o di cellulosa, di origine minerale come lana di vetro, di roccia o Perlite e isolanti a base polimerica come polistirene, poliestere ecc.. Ognuno di questi materiali presenta caratteristiche e configurazioni diverse e a seconda del caso bisogna valutare attentamente quale sia la scelta più performante.

E' da diversi anni che per far fronte a problemi come adattabilità, posa, lavorabilità, si stanno studiando e implementando gli intonaci termici. Essi sono applicabili sia esternamente che internamente, creano un vero e proprio strato isolante che permette di migliorare sensibilmente le prestazioni termiche della muratura. Sono applicati con spessori variabili, da qualche millimetro a pochi centimetri e, come gli intonaci tradizionali, sono composti da leganti idraulici, aggregati e additivi. I leganti, di origine minerale, sono principalmente a base cementizia o calcarea, gli additivi, tipo amido o cellulosa, hanno la funzione di modificare le caratteristiche dell'intonaco per facilitarne l'applicazione. Si parla di intonaci termici quando la sabbia viene sostituita con aggregati leggeri con buone proprietà isolanti.

Lo scopo della tesi è quello di caratterizzare le proprietà termo-igrometriche di intonaci isolanti composti da diverse tipologie di aggregati, e anche il comportamento dei termointonaci a base di aerogel. L'aerogel è il materiale presente sul mercato, con i più bassi valori di conducibilità, vogliamo quindi studiare il suo comportamento, capire le criticità e le possibili applicazioni per confrontarlo con quelle dei termointonaci tradizionali.

Il lavoro si è articolato nelle seguenti fasi:

- Ricerche di mercato riguardanti l'utilizzo degli intonaci termici, le diverse composizioni e possibili applicazioni, facendo particolare riferimento a materiali composti da aerogel
- Caratterizzazione delle proprietà termo-igrometriche: conducibilità termica, calore specifico, determinazione del contenuto di umidità tramite essiccazione ad elevate temperature, misura del coefficiente di assorbimento igroscopico, coefficiente di permeabilità al vapore acqueo, assorbimento d'acqua per immersione parziale
- Analisi numerica dei risultati ottenuti tramite simulazioni termoigrometriche, effettuate tramite il software Wufi Pro, del comportamento di sette intonaci termici, selezionati tra quelli analizzati e applicati su tre diverse tipologie murarie, in tre diverse situazioni climatiche, per valutarne le prestazioni, i possibili scenari di applicazione e ottenere dei confronti con le prescrizioni normative.

Nella fase iniziale di ricerca sono stati individuati i principali intonaci isolanti utilizzati negli interventi di retrofit energetico, inquadrando per ognuno lo stato dell'arte.

L'analisi sperimentale di caratterizzazione delle proprietà termiche e igrometriche è stata svolta nel laboratorio del dipartimento DENERG del Politecnico di Torino, dove sono state condotte diverse misure termoigrometriche sui materiali in esame con la camera climatica e il Termoflussimetro.

Per la fase di simulazione, tra i diversi materiali analizzati, ne sono stati scelti 7, applicati su diverse tipologie murarie in diverse località climatiche, per valutare quali siano le combinazioni più performanti.

Scopo del presente lavoro quindi, è quello di approfondire lo studio di queste nuove tipologie di materiali indagandone le caratteristiche termoigrometriche al fine di capire quali siano le composizioni più efficienti e competitive per la formulazione di nuovi intonaci termici.

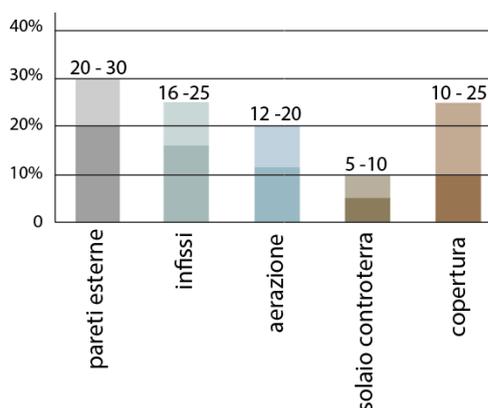
Si vuole poi simulare la risposta di tali materiali in opera per valutarne i cali prestazionali e per confrontare i risultati con le prescrizioni di legge evidenziando eventuali scostamenti e portando a sottostimare i carichi termici in fase di progettazione.

2. L'INVOLUCRO EDILIZIO

La riduzione dell'inquinamento e l'utilizzo di fonti energetiche sostenibili sono gli obiettivi verso cui la politica italiana ed europea sta puntando negli ultimi anni. Il settore edilizio è posto al centro di questa tematica in quanto l'utilizzo e la manutenzione degli edifici richiede grandi quantità di energia sia nel periodo invernale che in quello estivo.

Il fabbisogno energetico complessivo di una qualsiasi struttura in attività è dato da due fattori, uno legato alla richiesta di energia, l'altro legato alla dotazione impiantistica e alle prestazioni tecnologiche.

Grafico 2 *Principali cause delle dispersioni termiche negli edifici (Fonte Università luav – Rielaborazione grafica)*



Per incentivare la sostenibilità energetica sono state attuate diverse strategie: sono stanziati a livello nazionale fondi e incentivi per l'installazione di fonti di energie rinnovabili, sono proposti interventi per la sostituzione e manutenzione degli impianti di riscaldamento, raffrescamento e ventilazione [5]. Queste azioni ricadono tra le strategie energetiche attive in quanto intervengono direttamente sui consumi energetici dell'edificio.

Bisogna però sempre tenere presente che più del 30% delle dispersioni avvengono attraverso l'involucro, è quindi fondamentale adottare anche delle strategie energetiche passive per ridurre i consumi; con questo termine si indicano infatti tutti quegli interventi volti al miglioramento delle prestazioni dell'involucro edilizio.

Anche in questo caso sono stanziati fondi per ristrutturazioni e interventi di retrofit energetico, ma è dal 2015, con il Decreto Ministeriale del 26 giugno [7], che si dà una svolta concreta fissando i valori limiti delle trasmittanze termiche dell'involucro opaco. Questi parametri sono valutati per ogni zona climatica italiana, indicano i limiti massimi accettabili fino al 2021 ed è necessario osservarli per riuscire a rispettare gli obiettivi europei.

L'involucro edilizio, cioè l'insieme di elementi architettonici aventi la funzione di separare l'ambiente interno con l'esterno, è composto da diversi elementi disperdenti: strutture di copertura, strutture orizzontali inferiori, partizioni opache esterne e chiusure trasparenti [12]. Come accennato un ruolo determinante è svolto dalle partizioni opache esterne, l'altro fattore, forse ancora più influente, è rappresentato dai ponti termici.

I ponti termici possono essere definiti come una discontinuità costruttiva, zone in cui il flusso termico trasmesso è superiore rispetto ai componenti adiacenti [13]. Essi sono i punti di giunzione tra i diversi elementi costruttivi.

Le prestazioni termiche ed energetiche di un edificio non sono l'unico parametro da attenzionare se si vuole giungere ad una progettazione più attenta e consapevole. Il vero problema legato al comfort negli edifici è infatti l'umidità e il suo movimento, difficile da valutare poiché avviene all'interno e all'esterno dell'edificio ma anche intrinsecamente nei suoi componenti.

L'umidità non solo regola il trasporto della stessa sia in fase liquida, attraverso le forze capillari, sia in fase gassosa, ma influisce considerevolmente sulle prestazioni di tutto il componente. La presenza di umidità modifica il trasporto del calore poiché la conduttività λ è una caratteristica espressa in funzione della temperatura e dall'umidità:

$$\lambda = \lambda_0 (1 + b_\lambda (w/\rho))$$

b_λ rappresenta l'incremento in % di λ in presenza di umidità, dipende dal tipo di materiale e dallo stato fisico dell'acqua.

L'umidità influenza anche i meccanismi di accumulo di energia, si deve infatti considerare come ai materiali umidi si debba aggiungere l'entalpia dell'acqua in essi contenuta.

2.1. INTONACO

Nelle nuove costruzioni l'involucro edilizio viene già progettato con l'intento di rispondere a requisiti termoigrometrici controllati. Per quanto riguarda gli edifici storici risulta più difficile mediare le performances energetiche con i requisiti di comfort preservando contemporaneamente la qualità architettonica del manufatto e ciò risulta ancora più complesso nel caso di edifici soggetti a vincolo di tutela. Per queste ragioni negli ultimi anni hanno trovato sempre maggiore impiego gli intonaci termici, che con interventi poco invasivi contribuiscono a migliorare le prestazioni termiche ed energetiche degli edifici.

Il termine intonaco indica il rivestimento che viene applicato su pareti e soffitti con lo scopo di ricoprire le superfici murarie, con uno spessore che può variare da 5 a 20 mm. E' applicato esternamente per proteggere il manufatto dagli agenti atmosferici, quando è applicato internamente è usato come finitura e spesso assume anche una funzione estetica [14].

La norma europea EN 998-1:2016 è specifica per le malte per opere murarie, le classifica in base al dosaggio, possono essere preparate in fabbrica, pronte all'utilizzo o premiscelate [15].

Sono definite anche in base all'uso:

- Malte generiche (GP)
- Malte leggere (LW)

- Malte colorate (CR)
- Monostrato (OC)
- Da risanamento (R)
- Termoisolanti (T)

L'altra distinzione segue la norma UNI 10456:2008 [16], fatta in base le proprietà specifiche che descrivono il comportamento delle malte e quindi la conduttività termica, l'assorbimento d'acqua e la resistenza a compressione.

L'intonaco è costituito da tre componenti fondamentali: i leganti, gli aggregati e gli additivi.

2.1.1. Leganti

Sono materiali in polvere di origine minerale, a contatto con aria e acqua formano un impasto lavorabile che indurisce nel tempo, in grado di garantire coesione e resistenza meccanica una volta asciutto. Possono essere distinti in leganti aerei, che quindi fanno presa solo a contatto con l'aria, e sono il gesso, la calce e il cemento, e in leganti idraulici, tra cui alcuni cementi, la calce idraulica e l'argilla, che induriscono in presenza di aria e acqua.

2.1.1.1. Gesso

Il gesso, dall'aspetto bianco-grigiastro, si ottiene dalla cottura della pietra da gesso, ha una bassa conduttività termica e buona resistenza al fuoco, è facilmente lavorabile poiché non si ritira e quindi non necessita della presenza di inerti. E' da evitare il contatto con l'acqua, che ne può causare la marcescenza, per questo è utilizzato prevalentemente per usi interni [17].

2.1.1.2. Calce

La calce si distingue in calce aerea e calce idraulica naturale. La calce aerea "viva" si forma dalla cottura a 900°C del carbonato di calcio che, posta a contatto con l'acqua, diviene calce "spenta". Presenta una buona permeabilità al vapore e molto spesso viene miscelata insieme a pozzolana o a loppa d'altoforno per formare la calce idraulica.

La calce idraulica naturale, utilizzata fin dall'antichità date le sue caratteristiche di rigidità e lavorabilità, è prodotta principalmente tramite cottura a elevate temperature di rocce calcaree e marmi. Si distingue la calce idraulica, principalmente utilizzata per gli intonaci e che presenta buona resistenza meccanica e buona permeabilità al vapore, e il grassello, polvere bianca molto fine che trova applicazione anche come reagente [18].

2.1.1.3. Cemento

Dalla macinazione di marne e argille nasce il cemento. Questo materiale grazie al processo di idratazione forma un composto lavorabile che fa presa e indurendo garantisce alte prestazioni di resistenza meccanica e stabilità [19]. Negli ultimi 50 anni è stato spesso sostituito alla calce poiché

meno costoso e più facilmente lavorabile, è da tenere presente però che esso presenta caratteristiche di igroscopicità molto ridotte, è quindi sconsigliata la sua applicazione su edifici storici.

2.1.1.4. Argilla

Questo tipo di intonaci sono composti da argille prive di parti organiche miscelati con sabbia o paglia. È igroscopica ed è utilizzata principalmente per usi interni e risulta particolarmente indicato per abitazioni in legno o a secco [20]. Bisogna prestare attenzione però poiché è un prodotto molto permeabile all'acqua ed è necessario l'inserimento di una rete metallica come supporto, come nella maggior parte degli intonaci.

2.1.1.5. Resine

Ci sono poi intonaci costituiti da leganti sintetici, meglio definiti come "resine", sono materiali molto duttili e viscosi che aderiscono bene al supporto garantendo anche un'elevata resistenza a flessione. Di facile stesura sono però derivate del petrolio e ciò le rende poco sostenibili dal punto di vista ambientale [21].

2.1.2. Aggregati

Gli aggregati tradizionalmente impiegati sono materiali di origine minerale, principalmente sabbie. Essi sono selezionati e miscelati in base alle caratteristiche che si vogliono ottenere dall'intonaco finale. Per questo la loro granulometria è molto variabile e può essere fine come quella di sabbie che hanno un minimo di 0,01 mm, o più grossa fino ad un massimo di 2 mm. La norma UNI EN 12620 [22] ne definisce le proprietà e i requisiti in base la granulometria, la forma e la densità e da indicazioni sulle modalità di impasto. Se si vogliono ottenere prestazioni particolari possono essere sostituiti con altri prodotti, come appunto Perlite, sughero, PET, e altri materiali isolanti.

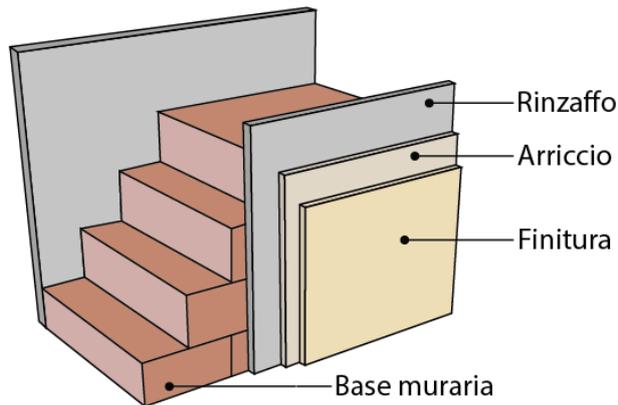
2.1.3. Additivi

Gli additivi sono sostanze introdotte durante la miscelazione per modificare specifiche proprietà dell'intonaco, sono aggiunti in piccole quantità, ad esempio per dare maggiore lavorabilità all'impasto, sono quindi additivi detti "fluidificanti" o "superfluidificanti". Altri modificano i tempi di presa e sono gli "acceleranti" o "ritardanti", gli "aeranti" fungono da protezione durante i cicli di gelo-disgelo [23].

2.1.4. Applicazione

Lo strato a contatto con la muratura è chiamato rinzaffo, ha una granulometria grossolana poiché ha il compito di aderire al supporto e quindi deve avere un'elevata resistenza alle sollecitazioni.

Figura 2 Layers che compongono gli intonaci
(Rielaborazione grafica)



Lo scheletro del sistema intonaco è rappresentato dall'arriccio, uno strato a granulometria più fine ma con uno spessore più consistente, che arriva fino ai 20 mm, deve essere applicato in modo uniforme sulla superficie [24]. Esso ha quindi lo scopo di dare planarità al supporto e funge da barriera protettiva per gli strati più interni. La finitura o rasatura è l'ultimo strato e principalmente ha funzione estetica.

La stesura dei vari layer può essere fatta sia a mano che a macchina e ciò dipende dal tipo di materiali utilizzati e dal numero di strati che sono richiesti. Anche lo spessore totale dell'intonaco è dipendente dall'utilizzo e dal punto di applicazione; infatti gli intonaci per estero possono raggiungere sezioni anche di 30 mm, gli intonaci per interno generalmente non superano i 15 mm. Gli intonaci termici invece sono applicati in spessori maggiori, fino a 60 mm.

3. TERMOINTONACI

I termointonaci sono particolari malte ottenute utilizzando in parte aggregati tradizionali in parte aggregati con proprietà isolanti, che ne migliorano le prestazioni termiche.

Presentano diversi punti di forza in relazione alla possibilità di impiego per il retrofit energetico degli edifici esistenti, che negli ultimi anni hanno generato un interesse crescente verso questo tipo di tecnologia.

Rispetto molti coibenti i termointonaci presentano una facilità di applicazione notevole: a differenza dei classici pannelli isolanti essi possono essere stesi su superfici non piane permettendone il livellamento, inoltre avendo uno spessore contenuto non causano la riduzione della superficie utile di pavimento, che invece avviene quando si interviene con un cappotto.

Possono essere una valida soluzione soprattutto nei casi in cui si debba intervenire su beni storici o vincolati, infatti l'utilizzo di un intonaco isolante non compromette la geometria del manufatto, può essere applicato esternamente, internamente o localmente andando a migliorare sensibilmente le prestazioni termiche dell'edificio.

Nel caso in cui una ristrutturazione preveda il ripristino degli intonaci esistenti questo tipo di soluzione risulta ottimale in quanto con facilità è possibile sostituire il prodotto ammalorato con il termointonaco sull'elemento murario, portando quindi all'aumento della resistenza termica.

Le caratteristiche termoigrometriche di un qualsiasi intonaco dipendono in larga parte dal tipo di legante che compone il materiale. Come accennato precedentemente infatti ogni tipologia di legante presenta diverse caratteristiche granulometriche, di permeabilità al vapore, di porosità ecc.. In particolare la conducibilità varia considerevolmente, da valori di 0,34 W/mK per il gesso [25], a valori di 1,2 W/mK per il cemento Portland. E' quindi fondamentale valutare attentamente la scelta di ogni singolo componente per la formulazione di un intonaco isolante se si vogliono raggiungere alte prestazioni di isolamento.

Affinchè un intonaco possa dirsi "termico" deve rispettare determinati parametri, la norma UNI 998-2:2010 li distingue in due classi [26]: tipo T1 con conduttività termica inferiore a 0,20 W/mK e in tipo T2 con conduttività termica inferiore a 0,10 W/mK.

Inoltre gli aggregati che li compongono oltre ad avere bassa conduttività sono caratterizzati da una bassa densità e per questo sono denominati LWA, Light Weight Aggregates.

Una classificazione può essere fatta sulla base della loro origine:

- Minerali, come perlite, vermiculite, argilla espansa, pietra pomice, ecc..
- Vegetali, come legno, sughero, canapa, pannocchia, ecc..
- Artificiali, come poliuretano, polistirene espanso, gomma, ecc..

La norma EN 13055:2016 [27], specifica per gli LWA, li distingue in base al tipo di lavorazione adottata per la loro produzione, avremo:

- Naturali, per i quali si prevede un semplice processo di frantumazione
- Artificiali, materiali formati tramite processi industriali nei quali si prevedono modifiche termiche
- Artificiali derivanti da sottoprodotti industriali, derivano sempre da processi industriali nei quali però vi sono lavorazioni di tipo meccanico

3.1. Aggregati minerali

3.1.1. Perlite

La Perlite è una roccia vulcanica effusiva che quando viene scaldata tra i 550 e i 900 °C si espande: l'acqua contenuta nei pori viene vaporizzata formando una struttura con macroporosità aperta connesse ad una microporosità chiusa interna al granulo. Questo processo causa un aumento del volume di circa 20 volte e dona al materiale leggerezza e un alto potere termoisolante [28]. Tra tutti gli LWA di origine minerale è quella a presentare i più bassi valori di conduttività termica, che varia da 0,038 a 0,044 W/mK.

Quando è utilizzato come aggregato per gli intonaci isolanti a base di gesso, e raggiunge conduttività di 0,16 W/mK [29], valore decisamente più basso se confrontato con quello di intonaci tradizionali. Negli intonaci con calce e cemento studiati in questa ricerca, è stata aggiunta fino all'80% in volume, ottenendo un miglioramento della conduttività termica che risulta pari a 0,21 W/mK [30]. Altri studi riportano valori di conduttività di 0,147 W/mK [31].

3.1.2. Pomice

La pietra pomice, minerale di origine magmatico a struttura alveolare, si è generato durante le fasi di solidificazione della lava, è composta principalmente da silicio, ed è caratterizzata da porosità e leggerezza. E' ritenuto uno dei più antichi materiali da costruzione è infatti citato da Vitruvio nel "De architectura" ed elogiato per l'elevata resistenza a compressione e per essere un materiale incombustibile. Possiede inoltre proprietà idrauliche latenti per cui quando è miscelato con il cemento ne aumenta la resistenza meccanica e migliora le prestazioni termiche. In base al tipo di processo di solidificazione della lava si distinguono pomice acide con densità che non superano i 1000 kg/m³, e pomice basiche con densità fino a 2000 kg/m³ [32]. In campo edilizio sono utilizzate le pomice acide, maggiormente presenti in natura.

I risultati più performanti nell'intonaco con aggregato di pomice, riportano valori di conduttività termiche di 0,08 W/mK [33].

Altri studiosi hanno analizzato il comportamento di intonaci a base cemento-pietra pomice aumentandone gradualmente il quantitativo di aggregato. Sono stati registrati valori meno

performanti, la conduttività termica risulta pari a 0,7 W/mK quando si raggiunge il 100% di aggregato in pomice [34].

3.1.3. Vermiculite

La Vermiculite è un minerale della famiglia dei fillosilicati che si presenta sotto forma di scaglie o cristalli, dal colore giallo-dorato. Viene sottoposta a macinatura e cottura ad elevate temperature (più di 300 °C), in modo tale che evapori l'acqua cristallizzata nei pori e avvii il processo di esfoliazione. E' proprio grazie a questo procedimento che si creano delle microcavità all'interno che portano ad un aumento di volume fino a 30 volte e ad una conseguente diminuzione della densità con valori dai 65 ai 150 kg/m³ [35]. Questo materiale è ampiamente impiegato in edilizia in quanto presenta numerose caratteristiche che lo rendono adatto a svariati utilizzi: oltre ad essere atossico e incombustibile funge da regolatore di umidità ed è inattaccabile da funghi e batteri [36].

Per formare il termointonaco la vermiculite è miscelata con gesso e sabbia, raggiungendo valori di conduttività termica pari a 0,25 W/mK [37], altri studi riportano oltre alla vermiculite, l'aggiunta di fibre di polipropilene per migliorarne la resistenza meccanica, ciò causa un considerevole aumento della conduttività termica (0,42 W/mK) [38].

3.1.4. Argilla espansa

L'argilla espansa viene macinata in base la granulometria che si vuole ottenere per il prodotto finito, viene poi cotta a temperature sempre maggiori che causano l'aumento di volume di 5 volte e la successiva formazione di sfere porose racchiuse da un guscio molto rigido [39]. Queste sue caratteristiche di leggerezza e porosità la rendono adatta a divenire parte dell'aggregato che compongono gli intonaci termici.

Miscelata con malte cementizie dona all'intonaco un'ottima resistenza meccanica a compressione e una conduttività termica di 0,25 W/mK [40]. Inoltre uno dei punti a favore nell'utilizzo di questo materiale è il fatto che sia realizzato con una materia prima abbondante e sostenibile, con un basso impatto sull'ambiente.

3.1.5. Diatomite

La diatomite, di origine silicea sedimentaria, sono resti fossili di piccole alghe della famiglia delle diatomee. E' quindi una roccia dal colore giallognolo di origine organica molto porosa, costituita principalmente da silice amorfa [41].

Nella formulazione di intonaci se miscelata con gesso per circa il 20% in massa, porta ad una conducibilità termica di 0,384 W/mK. Aumentandone il quantitativo all'interno del composto i valori di conducibilità restano quasi invariati ma si nota un notevole incremento delle prestazioni

meccaniche dell'intonaco: basta un'aggiunta del 10% di diatomite per avere un miglioramento della capacità di resistenza a compressione del 75% [42].

3.1.6. Altri aggregati minerali

Data la loro diffusione sul territorio e la facile reperibilità sono state analizzate anche altre rocce sedimentarie per la formulazione di intonaci: la dolomite finemente macinata e miscelata con calce idrata porta a conduttività termiche di 0,13 W/mK [43]. Altri studi si sono concentrati sull'utilizzo di questo materiale, anche aggiunta in piccole quantità permette di migliorare la resistenza meccanica e l'adesione del composto sulle superfici, non sono state approfondite le proprietà termoigrometriche [44].

Tabella 1 Riassunto termointonaci con aggregati minerali

rif	Legante	Aggregato	λ [W/mK]
[43]	calce idrata	dolomite	0,13
[30]	calce+cemento	perlite espansa	0,147
[40]	calce+cemento	argilla espansa	0,25
[83]	calce+cemento	perlite espansa	0,231
[32]	cemento	perlite espansa	0,21
[33]	cemento	pietra pomice	0,08
[34]	cemento	pietra pomice	0,7
[29]	gesso	perlite	0,16
[38]	gesso	vermiculite + polipropilene	0,42
[42]	gesso	diatomite 10%	0,464
[42]	gesso	diatomite 10%+polipropilene 0,5%	0,45
[42]	gesso	diatomite 10%+polipropilene 1%	0,455
[42]	gesso	diatomite 20%	0,39
[42]	gesso	diatomite 20%+polipropilene 0,5%	0,387
[42]	gesso	diatomite 20%+polipropilene 1%	0,384
[37]	gesso+sabbia	Vermiculite	0,25

3.2. Aggregati vegetali

3.2.1. Sughero

Il sughero, tessuto vegetale che riveste le radici e il fusto delle piante, è un materiale rinnovabile, ecologico e ampiamente diffuso in molte aree del pianeta. Viene utilizzato per le sue proprietà di impermeabilità, elasticità e traspirabilità, la sua natura porosa inoltre gli conferisce notevoli caratteristiche di isolamento acustico e termico, spicca nel settore edilizio ma è largamente utilizzato in tutti i settori [45].

E' importante sottolineare come questo materiale rispetti tutti i requisiti di sostenibilità, il suo processo produttivo non impatta sull'ambiente e quasi la totalità del sughero mondiale è prodotto in Europa. Ha riscosso sempre maggior interesse e applicazione anche perchè

totalmente riciclabile, molti dei prodotti in commercio infatti derivano da processi di riutilizzo o riciclo.

Sono stati condotti diversi studi sull'utilizzo di sughero granulare negli intonaci isolanti: miscelato con il cemento si arriva a valori di conduttività termica di 0,4 W/mK con ottimi valori di resistenza meccanica [46]. Se è miscelato con gesso o calce si raggiungono valori di conduttività decisamente più bassi di 0,11 – 0,12 W/mK [47] quando il sughero sostituisce al 100% la parte di aggregato. Altri studi riportano valori di conduttività ancora inferiori (0,098 W/mK) e mettono in luce la correlazione diretta che vi è tra granulometria del sughero e prestazioni: aumentando il diametro dell'isolante aumenta notevolmente la capacità di isolamento termico [48].

3.2.2. Legno

Il legno da sempre rappresenta uno dei materiali più utilizzati in edilizia, oltre ad essere presente in abbondanza su tutta la Terra, è rinnovabile e, a seconda di che tipo di specie di tratti, presenta caratteristiche fisiche e meccaniche di notevole interesse. Negli ultimi anni sempre maggior rilievo occupano le tematiche di riciclo e salvaguardia ambientale, questo materiale viene spesso trattato con prodotti e vernici che ne modificano le caratteristiche di biodegradabilità, per questo sono condotte, in numero sempre maggiore, ricerche inerenti eventuali riusi [49].

Tra i diversi studi riguardanti il riutilizzo di elementi e componenti in legno, molti hanno portato a utilizzare questo materiale come aggregato per gli intonaci isolanti. Miscelato principalmente con il gesso ne sono valutate le prestazioni se aggiunto sotto forma di segatura o di truciolo. Aumentando il contenuto di segatura all'interno del composto si nota un graduale aumento della resistenza termica; aggiungendone per il 40% in massa si ottengono valori di conduttività termica di 0,14 W/mK, anche i valori di resistenza meccanica risultano buoni [50].

Per migliorare le prestazioni termiche sono state poi inserite nella miscela fibre di vetro o PET, che ne migliorano ulteriormente le prestazioni con conduttività pari a 0,089 W/mK [51].

3.2.3. Canapa

Tra gli isolanti di origine vegetale trova largo impiego la canapa, è stato appurato che era un materiale ampiamente usato già dalla fine del 500 d.C., ne è testimonianza un ponte situato nel sud della Francia costruito durante il periodo Merovingio e costituito da calce e canapa [52].

Questo materiale è dotato di elevata resistenza a trazione e ha la capacità di assorbire l'umidità per rilasciarla nel tempo.

E' stata miscelata con calce, calce idraulica, cemento; le migliori prestazioni termiche si ottengono legandola alla sola calce, raggiungendo valori di conduttività termica di 0,12 W/mK [53]. Altri studi

mettono in luce come a frammenti di dimensioni maggiori siano legate prestazioni termiche migliori (conduttività termica di 0,18 W/mK), risultano però scarse le proprietà meccaniche [54].

3.2.4. Palma da dattero

Le fibre vegetali rivestono un ruolo importante per quello che riguarda le ultime ricerche sugli intonaci isolanti: hanno conduttività termica di 0,17 W/mK e ne sono state approfondite le applicazioni quando miscelate con il calcestruzzo o appunto negli intonaci [55].

Le fibre del tronco della palma da dattero triturate secondo diverse granulometrie e miscelate con il gesso portano a conduttività termiche di 0,23 W/mK quando l'aggregato raggiunge il 10% in massa, con un quantitativo minimo del 2% si ottengono conduttività di 0,3 W/mK, valori ritenuti comunque competitivi se messi a confronto con le malte tradizionali [48].

Utilizzando paste a base di cemento e sabbia, miscelate con quantitativi crescenti di fibre (da un minimo del 5% ad un massimo del 30%) e secondo diverse granulometrie sono stati ottenuti risultati molto soddisfacenti. Utilizzando le granulometrie più fini come sostituzione della sabbia, per quantitativi fino al 15% in massa si ottengono conduttività di 0,14 W/mK, utilizzando la granulometria più grossa, di 6 mm e miscelata secondo gli stessi quantitativi si ottengono conduttività di 0,22 W/mK. Le caratteristiche prestazionali migliori sono ottenute quando si utilizza l'aggregato con granulometria mista inserita per il 30% in peso permettono di raggiungere conduttività termiche di 0,075 W/mK [56].

3.2.5. Gusci di mandorle

Con l'intento di rispondere ai requisiti di sostenibilità ambientale e riutilizzo di prodotti di scarto è stato studiato anche il guscio delle mandorle come aggregato per gli intonaci termici, poiché alla produzione di questo frutto sono legate milioni di tonnellate di residui agricoli. La tesi di B. D'Agata [57] spiega come miscelato con calce idraulica naturale porti ad aumentare la resistenza termica del composto, inserito secondo vari quantitativi i risultati più performanti riportano una conduttività termica di 0,109 W/mK.

3.2.6. Altri aggregati vegetali

Per quello che riguarda i termointonaci con aggregato di origine vegetale i risultati migliori dal punto di vista termico, sono stati raggiunti da formulazioni che comprendono mix di aggregati diversi. Leganti a base cemento e calce idraulica sono stati miscelati con paglia, sughero, tutolo di mais, perlite espansa, vermiculite espansa [58]. Gli intonaci composti da paglia, tutolo di mais e perlite hanno raggiunto conduttività termiche molto performanti, di 0,083 W/mK.

Tabella 2 Riassunto termointonaci con aggregati vegetali

rif	Legante	Aggregato	λ [W/mK]
[46]	cemento	sughero granulare	0,4
[47]	gesso+calce	sughero granulare	0,11
[48]	gesso	sughero granulare	0,098
[59]	gesso	legno truciolato	0,2
[50]	gesso	legno segatura	0,14
[51]	gesso	legno+PET+ fibre di vetro	0,089
[55]	gesso	fibre di palma 2%	0,304
[55]	gesso	fibre di palma 5%	0,252
[55]	gesso	fibre di palma 8%	0,237
[55]	gesso	fibre di palma 10%	0,232
[59]	calce+cemento	REC R1 40%	0,44
[59]	calce+cemento	REC R2 40%	0,357
[59]	calce+cemento	REC R1 40% + R3 40%	0,221
[59]	calce+cemento	REC R2 40% + R3 40%	0,198
[59]	calce+cemento	REC R1 30% + R3 70%	0,108
[56]	cemento+sabbia	fibre di palma 3mm 5%	0,39
[56]	cemento+sabbia	fibre di palma 3mm 15%	0,14
[56]	cemento+sabbia	fibre di palma 3mm 30%	0,1
[56]	cemento+sabbia	fibre di palma 6mm 5%	0,63
[56]	cemento+sabbia	fibre di palma 6mm 15%	0,22
[56]	cemento+sabbia	fibre di palma 6mm 30%	0,075
[56]	cemento+sabbia	fibre di palma 3+6mm 5%	0,39
[56]	cemento+sabbia	fibre di palma 3+6mm 15%	0,14
[56]	cemento+sabbia	fibre di palma 3+6mm 30%	0,075
[53]	calce idrata	canapa	0,12
[54]	calce	canapa	0,18
[57]	calce idraulica	gusci di mandorla	0,109
[58]	cemento+calce	paglia+tuorlo di mais+perlite	0,083

3.3. Aggregati artificiali

3.3.1. Poliuretano

Il termine poliuretano indica una vasta famiglia di polimeri. Sono impiegati per produrre una grande varietà di materiali e ampiamente utilizzati come isolante in edilizia in quanto è possibile la produzione in svariate forme: si trova in pannelli, rigidi o elastici, sottoforma di schiuma o sfuso. Per essere utilizzato all'interno dei termointonaci è miscelato in forma schiumata in quanto la sua struttura a celle chiuse gli dona ottime prestazioni di isolamento termico e impermeabilità all'acqua.

Nella maggior parte delle soluzioni analizzate l'aggregato polimerico deriva da materiale riciclato, esso infatti è uno dei materiali polimerici più utilizzati e quindi maggiormente presenti sul mercato.

Miscelato all'interno di malte da intonaco a base calcarea si ottengono ottimi valori di isolamento termico con conduttività di 0,06 W/mK, con paste a base cementizia si arriva a conduttività termiche di 0,10 W/mK [60]. Questa composizione presenta però bassissimi valori di resistenza meccanica, arrivare a valori di resistenza sufficienti comporta l'aumento della conduttività [61]. E' importante notare come il poliuretano diventi velenoso per la salute umana se esposto al fuoco, e in molti casi possa essere cancerogeno. La sua applicazione deve quindi essere attentamente valutata, l'Echa (Agenzia Europea per le Sostanze Chimiche) ha infatti emanato delle restrizioni per quanto riguarda l'uso di questo materiale [62].

3.3.2. Polistirene espanso

Il polistirene espanso, noto come EPS o più comunemente come polistirolo, è composto da aria per il 98%, carbonio e idrogeno. Tramite la polimerizzazione dello stirene si formano delle piccole perle che riscaldate sopra i 90 °C si espandono fino a 50 volte in volume, dando vita ad un materiale leggero e molto isolante [63].

E' uno dei materiali più utilizzati in edilizia come isolante termico data la leggerezza e la facilità di installazione, è ampiamente impiegato anche in altri settori del mercato, soprattutto per quello che riguarda gli imballaggi e il confezionamento dei prodotti. Esso infatti oltre ad essere idrofobo presenta ottime capacità di resistenza chimica, rendendolo immune anche a funghi e batteri.

Le migliori prestazioni termiche si sono ottenute dalla miscela polistirene-gesso con conduttività di 0,047 W/mK quando l'EPS occupa 80% in volume nel composto [64], sostituendo la miscela a base gesso con il cemento si registrano valori di conduttività termica di 0,065 W/mK [65]. Entrambe le soluzioni però non garantiscono un'adeguata resistenza a compressione, sono quindi state studiate più composizioni aggiungendo diversi quantitativi di EPS, è inserendo solo il 50% in volume di EPS che si assicura una adeguata resistenza meccanica ma ciò provoca un netto calo delle prestazioni termiche [65]. Lo studio portato avanti dalla Vilnius Gediminas Technical University [66] utilizza una miscela composta da calce cemento e sabbia in cui sono analizzati i comportamenti di diversi tipi di polistirene. Il mix contenente NEOPOR e grafite risulta il più soddisfacente in termini di prestazioni termiche: la conduttività registrata è pari a 0,09 W/mK [60] e anche le prestazioni di resistenza meccanica risultano migliorate.

E' importante sottolineare come qualunque sia il tipo di legante utilizzato, l'aggiunta anche in minime quantità di EPS porti benefici prestazionali all'intonaco in quanto oltre a migliorarne la conduttività termica ne aumenta la durabilità nel tempo.

3.3.3. Polietilene tereftalato

Polietilene tereftalato o PET, è una resina termoplastica utilizzata in tutti i campi del mercato, ha un'elevata resistenza chimica e all'abrasione e questa sua caratteristica la rende adatta al contatto alimentare. Questo materiale viene prodotto in enormi quantità e non essendo

biodegradabile negli anni si sono studiati numerosi scenari di recupero, alcuni di essi lo vedono come parte dell'aggregato degli intonaci termici.

Miscelato con cemento o calce idraulica si ottengono valori di conduttività termica pari a 0,268 W/mK e una buona resistenza a compressione [67], le prestazioni termiche risultano però poco efficienti se confrontate con quelle di altri materiali. Per ottenere delle caratteristiche termiche più performanti è necessario miscelare questo materiale con altri componenti, quali fibre di vetro, legno e additivi aeranti, si ottiene così una conducibilità termica di 0,089 W/mK [51].

3.3.4. Cellulosa

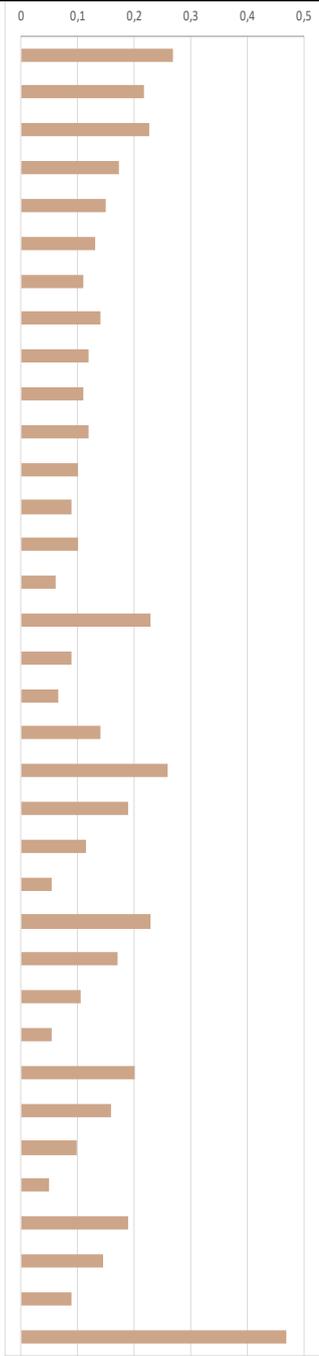
Sono state studiate diverse applicazioni anche per quello che riguarda l'utilizzo di materiali di scarto di origine polimerica come aggregato nella formulazione di nuovi intonaci. Numerose sono le ricerche che vedono la cellulosa come aggregato in malte cementizie, le prestazioni termiche risultano migliorate [68], utilizzata come aggregato negli intonaci si registrano conduttività termiche superiori rispetto quelle ottenute con altri aggregati (conduttività di 0,23 W/mK) [69].

3.3.5. Altri materiali artificiali

Tra i diversi materiali polimerici la gomma artificiale è quella a rappresentare la maggiore minaccia ambientale, essa infatti oltre a non essere biodegradabile e difficilmente riciclabile e rilascia numerosi gas a effetto serra se bruciata. Sono state portati avanti diversi scenari di recupero per questo materiale, soprattutto in campo edilizio viste le caratteristiche termiche e di durabilità. L'università Politecnica di Madrid ha portato avanti una ricerca in cui ha aggiunto diversi quantitativi di gomma, secondo diverse granulometrie ad intonaci a base di gesso. Con il 60% di aggregato in peso la conduttività termica misurata è di 0,14 W/mK, lo studio mette poi in evidenza come siano le composizioni con l'aggregato più fine ad ottenere prestazioni termiche migliori [70].

Tabella 3 Riassunto termointonaci con aggregati artificiali

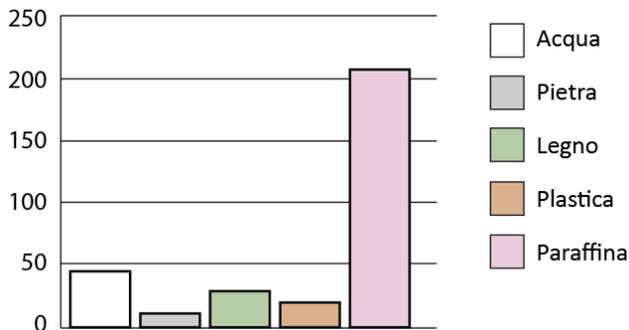
rif	Legante	Aggregato	λ [W/mK]
[67]	calce+cemento	PET	0,268
[67]	calce+cemento	PET+GRP	0,217
[67]	calce+cemento	WW	0,227
[67]	calce+cemento	WW+GRP	0,174
[66]	calce+cemento+sabbia	EPSC 1,15 l/kg	0,15
[66]	calce+cemento+sabbia	EPSC 1,50 l/kg	0,13
[66]	calce+cemento+sabbia	EPSC 1,75 l/kg	0,11
[66]	calce+cemento+sabbia	EPS 1,15 l/kg	0,14
[66]	calce+cemento+sabbia	EPS 1,50 l/kg	0,12
[66]	calce+cemento+sabbia	EPS 1,75 l/kg	0,11
[66]	calce+cemento+sabbia	NEOPOR® 1,15 l/kg	0,12
[66]	calce+cemento+sabbia	NEOPOR® 1,50 l/kg	0,1
[66]	calce+cemento+sabbia	NEOPOR® 1,75 l/kg	0,09
[60]	cemento	PUR	0,1
[60]	calce+cemento	PUR	0,06
[69]	cemento	cellulosa	0,23
[51]	cemento	PET + WW	0,089
[65]	cemento	EPS	0,065
[70]	gesso	gomma	0,14
[64]	gesso	EPS 20%	0,26
[64]	gesso	EPS 40%	0,19
[64]	gesso	EPS 60%	0,115
[64]	gesso	EPS 80%	0,055
[64]	gesso	EPS 20%+Tragacanth 0,5%	0,23
[64]	gesso	EPS 40%+Tragacanth 0,5%	0,17
[64]	gesso	EPS 60%+Tragacanth 0,5%	0,106
[64]	gesso	EPS 80%+Tragacanth 0,5%	0,053
[64]	gesso	EPS 20%+Tragacanth 1,0%	0,201
[64]	gesso	EPS 40%+Tragacanth 1,0%	0,16
[64]	gesso	EPS 60%+Tragacanth 1,0%	0,098
[64]	gesso	EPS 80%+Tragacanth 1,0%	0,049
[64]	gesso	EPS 20%+Tragacanth 1,5%	0,19
[64]	gesso	EPS 40%+Tragacanth 1,5%	0,146
[64]	gesso	EPS 60%+Tragacanth 1,5%	0,088
[64]	gesso	EPS 80%+Tragacanth 1,5%	0,47



3.4. PCM

I PCM, Phase Change Materials, considerati tra i materiali più innovativi nel settore dell'efficienza energetica, sono accumulatori di calore latente, sono in grado di reagire in modo dinamico alle escursioni termiche che avvengono nell'ambiente circostante [71].

Grafico 3 Energia specifica in KJ/Kg: energia contenuta in 1 kg di materia [71] (Rielaborazione grafica)



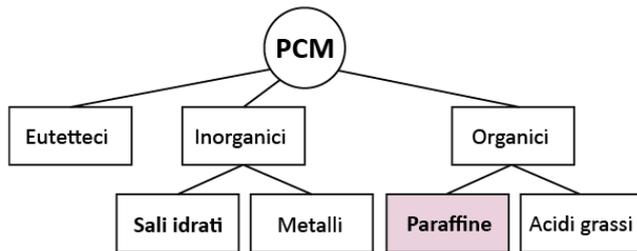
Ciò significa che quando la temperatura sale e supera determinati valori, questi materiali passano alla fase liquida accumulando calore, quando la temperatura scende essi solidificano, cedendo il calore all'ambiente; la loro temperatura resta costante durante i cambiamenti di fase.

Questo comportamento è possibile perché questi materiali sono in grado di immagazzinare calore per unità di volume fino a 14 volte in più rispetto i materiali tradizionali come pietra e cemento [72]. A seconda del materiale la temperatura di transizione di fase varia da -100°C a 800°C e di solito si trovano allo stato solido a temperatura ambiente. Possono essere di origine organica e inorganica e ognuno di essi ha caratteristiche di accumulo e di transizione differenti [73].

Si deve al fisico Alan Tower Waterman la scoperta dei materiali a capacità termica migliorata, che con il suo lavoro presso l'università di Yale capì come modificare le caratteristiche di conduttività di alcuni Sali [74]. I primi studi che vedono l'uso di questi materiali nel settore edilizio risalgono al 1948 e vedono l'utilizzo del "sale di Glauber" come sistema passivo per l'assorbimento del calore in un edificio residenziale in Massachusetts. La dottoressa Maria Telkes inserì questi Sali in appositi contenitori ubicati al centro delle sale principali e collegati da un sistema di ventilazione. Il sistema riuscì a garantire, senza gli apporti solari, le condizioni di comfort termico per 11 giorni, ad oggi questa abitazione è considerata una delle prime "passiv solar house" [75]. Negli anni seguenti queste sperimentazioni furono riproposte con nuove formulazioni anche in altri edifici. E' negli anni '80 che si punta l'attenzione su questi materiali, aumenta rapidamente la ricerca nel campo aerospaziale così come in quello edilizio, se ne migliorano le prestazioni e per la prima volta sono utilizzati come aggregato nella composizione di intonaci termici [76].

3.4.1. Uso in edilizia

Figura 3 Classificazione PCM (Rielaborazione grafica)



Negli ultimi anni gli studi riguardanti le tematiche di efficienza energetica mettono in evidenza come siano fondamentalmente due i fattori a influenzare maggiormente le prestazioni dell'involucro edilizio: la trasmittanza termica e l'inerzia termica.

La prima ha lo scopo di limitare la trasmissione del calore tra interno ed esterno, la seconda ritarda l'effetto delle sollecitazioni termiche in quanto tutti i materiali sono accumulatori di calore latente. L'accumulo di calore è legato a sollecitazioni variabili nel tempo, per valutare i benefici apportati da murature con elevata inerzia è quindi necessario fare delle valutazioni in regime dinamico. L'inerzia termica dipende principalmente dalla massa e dal calore specifico della sostanza, i materiali a cambiamento di fase rappresentano quindi un campo di indagine molto interessante poiché riescono ad immagazzinare il calore accumulato durante il giorno fino a 14 volte di più rispetto ai materiali dell'edilizia tradizionali, per poi rilasciarlo durante le ore notturne. Gli studi portati avanti da Y. Kusama mettono in luce proprio come i PCM siano un'applicazione interessante nell'ambito edilizio in quanto smorzano e ritardano le fluttuazioni giornaliere delle temperature e come diretta conseguenza la temperatura negli ambienti interni risulti avere un andamento più stabile [77].

Vi sono diverse tipologie di materiali a cambiamento di fase, i più utilizzati sono quelli ottenuti dalle paraffine e dagli idrocarburi e con cambiamento di fase da solido a liquido. Per controllare la transizione e evitare la perdita di liquido il materiale è racchiuso all'interno di piccole sfere, con un diametro variabile dai 2 ai 20 μm a seconda dell'utilizzo. Questo processo è chiamato micro incapsulamento o macro incapsulamento [78], rende chimicamente inerte il materiale e ne evita le variazioni di volume.

Le paraffine sono miscele di idrocarburi dalla consistenza cerosa, ottenuti tramite distillazione del petrolio. Le temperature di transizione variano tra i -8°C e i 40°C e possiedono un'alta stabilità chimica anche dopo innumerevoli cicli di congelamento e scongelamento [79].

I Sali idrati sono solidi cristallini formati da molecole di sale unite a molecole d'acqua con temperatura di fusione compresa tra 15°C e 80°C e tra i materiali a cambiamento di fasi sono quelli più a basso costo [71].

3.4.1.1. Uso come aggregato nei termointonaci

Sono stati condotti numerosi test riguardanti l'utilizzo dei materiali a cambiamento di fase negli intonaci isolanti, più che influenzare la conduttività termica essi apportano, come abbiamo visto, notevoli benefici per quello che riguarda l'incremento dell'inerzia termica.

Gli studi di Jaworski et al. [74] hanno miscelato diversi quantitativi di Micronal DS 5008 X, della famiglia delle paraffine, con intonaci di gesso, arrivando a conduttività termiche di 0,23 W/mK con un quantitativo di aggregato presente per il 30% in massa. Altri studi riportano invece valori di conduttività decisamente inferiori, di 0,087 W/mK quando il materiale lavora a 30 °C, a 19 °C i valori di conduttività subiscono un notevole incremento, con valori di 0,24 W/mK [80]. Nella stessa ricerca si è poi studiato il comportamento di queste paraffine quando aggiunte ad intonaci con leganti a base di calce aerea e pozzolana. La conduttività ottenuta, di 0,55 W/mK, pur non raggiungendo il requisito normativo di intonaco isolante, risulta comunque più bassa di quella di un tradizionale intonaco a base calce.

La ricerca condotta da Z. Pavlik su intonaci a base di calce e cemento con PCM, dichiara come l'aggiunta del materiale a cambiamento di fase aumenti di circa il 10% la porosità dell'intera malta [81]. Inoltre all'aumentare del quantitativo di PCM aumenta la capacità di immagazzinamento dell'umidità, ciò porta notevoli benefici per quello che riguarda la qualità dell'aria degli ambienti interni. I valori di conduttività registrati sono di 0,18 W/mK [81].

Gli studi più recenti vedono l'aggiunta di PCM al posto della sabbia in malte miste, composte da calce idrata, argilla e fibre d'avena, con valori finali di conduttività termica di 0,38 W/mK [82].

Tabella 4 Riassunto termointonaci con PCM

rif	Legante	Aggregato	λ [W/mK]
[81]	calce+cemento	PCM	0,18
[80]	calce aerea+pozzolana	PCM	0,55
[74]	gesso	Micronal DS 5008 X 10%	0,34
[74]	gesso	Micronal DS 5008 X 20%	0,27
[74]	gesso	Micronal DS 5008 X 30%	0,23
[82]	calce idrata	Micronal DS 5040 X+argilla+fibre d'avena	0,38
[82]	calce idrata	Micronal DS 5040 X +argilla+fibre d'avena	0,5
[80]	gesso	PCM a 30°	0,087
[80]	gesso	PCM a 19°	0,24

3.5. AEROGEL

L'aerogel è la sostanza solida più leggera al mondo, è costituita per il 98% di aria e per il 2% di silice amorfa, viene definito come materiale superisolante poiché la sua conduttività termica non raggiunge i 0,020 W/mK [83]. Alla vista è semitrasparente sui toni del bianco-azzurro, presenta una densità a secco di 3 kg/m³ e la sua struttura nanoporosa, con una porosità fino al 98%. L'assenza di conduzione gassosa nel materiale è proprio dovuta alla dimensione contenuta dei pori, di 20 nm, inoltre la formulazione semi-opaca limita le trasmissioni di calore per irraggiamento [84].

Non è considerato nocivo per la salute umana in quanto il silicio è presente sotto forma amorfa e quindi non è cancerogeno. Se esposti a contatto prolungato può però portare fastidi alle vie respiratorie e irritazioni cutanee, questo perché essendo un materiale poroso e idrofobico disperde velocemente l'umidità delle superfici a contatto con esso, lasciando un effetto di secchezza e di disidratazione.

La scoperta dell'aerogel deriva dalle prime sperimentazioni portate avanti da S. Kisteler del College of the Pacific a Stockton in California, nel 1931, che capì che eliminando la fase liquida contenuta in un gel si ottiene una matrice solida.. Egli scoprì il modo per asciugare un gel senza arrivare al collasso provocato dall'elevata tensione superficiale esercitata dal liquido in evaporazione [85]. Vennero creati così diversi tipologie di Aerogel, quello più utilizzato deriva dal gel di silice.

Il processo produttivo avveniva a temperature molto elevate per lunghi periodi di tempo [86], per questo la scoperta inizialmente non destò particolare interesse nel mondo scientifico. I primi usi risalgono al settore aerospaziale: il professor Stanislaus J. Teichner propose l'uso di Aerogel per lo stoccaggio del combustibile dei razzi [87]. Visto il potenziale di questo nuovo materiale gli studi successivi si posero come obiettivo quello di ottimizzare e velocizzare il processo produttivo.

Un passo importante fu fatto a metà degli anni '80 dall'università di Berkeley che riuscì a portare la temperatura di asciugatura da 270°C a 40°C e a concludere il processo produttivo in 10 ore [88].

Un notevole incremento di interesse nei confronti di questo materiale nacque a seguito delle due missioni spaziali del 1997 in cui questo materiale fu utilizzato per la prima volta per l'isolamento di alcune parti elettroniche delle navicelle [89].

Dagli anni '90 ne fu incrementata la produzione e quindi l'utilizzo, investendo anche il settore dell'industria, delle sperimentazioni laser, e dell'edilizia, furono sviluppati anche aerogel basati su alluminio, cromo, stagno e carbonio.

Negli ultimi decenni la fabbricazione di questo materiale è notevolmente aumentata: nel 2014 ammontava a 10700 tonnellate e vedevano gli Stati Uniti come principale produttore, a oggi si stima un aumento della richiesta superiore al 23% annuo [90] con

una spesa di oltre 1700 milioni di euro all'anno [91]. Il principale settore in cui viene utilizzato l'Aerogel resta quello dei combustibili che ricopre circa il 75% del mercato globale, in aumento l'uso nel settore delle costruzioni e dell'isolamento termico [92], viste anche le sempre più stringenti normative sul risparmio energetico.

Il processo di sintesi consta di 4 fasi:

- 1) La preparazione e formazione del gel avviene tramite la dispersione e poi l'unione delle particelle di ossido di silicio, esse generano un agglomerato a struttura tridimensionale.
- 2) L'invecchiamento rende il gel più duro e ne migliora la resistenza.
- 3) L'essiccamento supercritico, che avviene a temperature e pressione molto elevate, fa sì che il fluido presente nella struttura del gel sia espulso e poi sostituito dall'aria. Affinchè questo avvenga è necessario che la pressione diminuisca lentamente in modo tale che gli effetti di tensione superficiale non distruggano la matrice stessa [89].
- 4) L'ultimo passaggio è il trattamento idrofobizzante, necessario affinché il materiale non degradi se sottoposto a umidità elevate.

3.5.1. Uso in edilizia

In edilizia è disponibile sottoforma di pannelli: flessibili, opachi o traslucidi oppure in forma granulare con dimensioni dei grani variabile a seconda del produttore e delle caratteristiche di isolamento. Distinguiamo l'Aerogel granulare quando il diametro varia da pochi millimetri fino a 1 cm, Aerogel monolitico con spessori maggiori di 1 cm e ne è possibile la produzione sia in forma opaca che traslucida [93], Aerogel composito quando al suo interno sono presenti anche altri tipi di materiali che conferiscono determinate caratteristiche [94].

Nonostante sia il materiale più isolante disponibile sul mercato, e sia disponibile in formati diversi, l'Aerogel in edilizia risulta poco utilizzato a causa del suo costo elevato e poco competitivo rispetto quello degli isolanti tradizionali [95]. Ad esempio se prendiamo in considerazione il prezzo medio dei pannelli rigidi, per spessori che variano dai 10 ai 13 mm, il costo oscilla dai 25 ai 35 €/m² [96], assai più elevato rispetto quello di un isolante di origine minerale, facilmente reperibile a 4 €/m².

Gli isolanti a base Aerogel vengono principalmente usati per [97]:

- Interventi di riqualificazione energetica di edifici storici
- Copertura delle zone di un edificio in cui vi sono ponti termici critici
- Situazioni in cui gli spazi per posizionare gli isolanti sono molto ristretti

Essendo un materiale semi-trasparente ne sono state studiate diverse applicazioni anche per quello che riguarda gli infissi: all'interno dei vetrocamere o come vetri monolitici. Si sono notate delle considerevoli riduzioni della trasmittanza della componente vetrata, con valori di 0,5 W/m² K, si assiste quindi una riduzione delle perdite di calore stimata fino al 55% [98].

Di recente si è provato a utilizzare questo materiale in forma granulare (conduttività termica di 0,0186 W/mK e densità tra 80 e 200 kg/m³) come aggregato per calcestruzzi e intonaci termici [99].

3.5.1.1. Uso come aggregato nei termointonaci

Le ricerche portate avanti da L. Zhao-hui et al. hanno visto l'uso di basi cementizie miscelate con diversi quantitativi di aerogel, dal 10 al 60% in massa. I risultati più performanti dal punto di vista di requisiti termici si sono ottenuti con un quantitativo di Aerogel del 60%, in quanto la conduttività termica risulta di 0,1524 W/mK e anche la resistenza meccanica a compressione restituisce risultati sufficienti per l'applicazione in situ [100].

Risultati più soddisfacenti sono stati ottenuti da Doshi e Miller che nel 2011 hanno brevettato [101] un metodo per la preparazione e l'applicazione di un intonaco isolante con Aerogel. Il testo spiega come combinare leganti minerali, l'isolante e altri ingredienti facoltativi come opacizzanti, fibre o ritardanti, per ottenere una malta dalle ottime capacità termiche e meccaniche, in grado di indurire e di garantire la resistenza a compressione espressa dalle normative. A seconda della temperatura sono riportati diversi valori di conduttività termica, le migliori prestazioni sono ottenute a 37 °C con conduttività di 0,016 W/mK, comunque in tutte le casistiche analizzate i valori di conduttività non superano i 0,05 W/mK [102].

L'Università di Bologna ha condotto numerosi studi riguardo l'utilizzo del nuovo nanomateriale; inizialmente sperimentato quando miscelato con calcestruzzo e cemento Portland. L'aggiunta del 30% in massa porta a conduttività termiche di 0,15 W/mK, valore decisamente più basso se confrontato a quello delle malte tradizionali. Sono stati indagati poi gli altri possibili utilizzi: adoperando come legante la calce idraulica e inserendo diversi quantitativi di isolante, sono stati ottenuti ottimi valori di conduttività termica. I campioni più performanti riportano valori di 0,0311 W/mK per un quantitativo di aggregato di Aerogel del 70% [103].

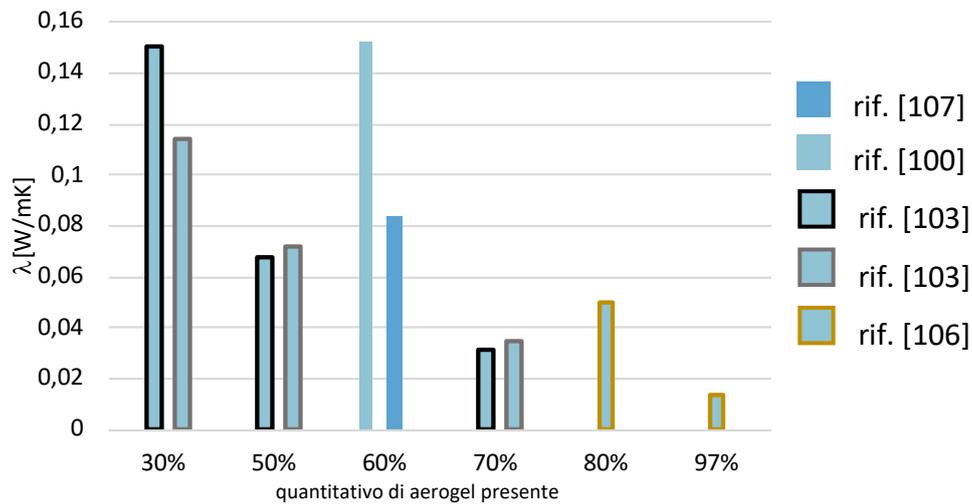
Altri studi, riguardanti la formulazione di paste cementizie adatte alla costruzione di nuovi edifici, mettono in luce come utilizzando polvere di Aerogel anziché granuli, si ottengano sostanziali riduzioni di conduttività termica anche inserendo quantitativi ridotti (per un massimo del 2% in peso) di isolante [104]. Per quello che riguarda l'utilizzo di polvere di Aerogel negli intonaci lo studio di M.F.Khamidi [105] riporta una conduttività di 0,076 W/mK quando la presenza dell'isolante è pari a 20ml, lasciando ampio campo di indagine per sperimentazioni future.

Comunque per tutte le miscele studiate è stato appurato che maggiore è il quantitativo di isolante e migliori sono le prestazioni termiche ottenute. Emerge chiaramente nella ricerca portata avanti da Buratti et al. [106] in cui si ottiene un intonaco con conduttività termica di 0,014 W/mK con quantitativi di aerogel granulare presenti per il 97% nella miscela. Per ottenere un quadro più completo viene studiata l'applicazione in situ: su un immobile degli anni 60 viene steso internamente uno strato di intonaco composto per l'80% da aerogel, con una conduttività termica

pari a 0,05 W/mK. L'analisi termografica a infrarossi rivela una differenza di 2 °C tra il muro di progetto e quello adiacente non isolato, dimostrando l'efficacia del prodotto.

Sono state sperimentate anche formulazioni miste, che utilizzano aerogel (60% in volume), sughero espanso (20% in volume), argilla espansa (15% in volume) e perlite (5% in volume), la conduttività termica risulta di 0,084 W/mK [107].

Grafico 4 Conduttività termica in funzione del contenuto di aerogel



Ad oggi l'azienda Rofix rende disponibili sul mercato due termintonaci con aerogel: Fixit 222, con conduttività termica di 0,028 W/mK, e Fixit 224 con conduttività di 0,048 W/mK [108].

K. Ghazi Wakilia et al. hanno studiato e monitorato per 5 mesi il comportamento del Fixit 222 su un edificio in mattoni costruito negli anni 50 a Vienna [109]. Applicato esternamente, con uno spessore di 40 mm, l'intonaco riduce del 60% la trasmittanza termica della parete e migliora il comfort interno in quanto aumenta la differenza di temperatura tra esterno ed interno di 1-2 °C rispetto la situazione iniziale.

Diversi studi si sono concentrati sull'analisi del calo prestazionale del materiale nel tempo, gli intonaci potenziati con aerogel perdono la loro resistenza termica a un ritmo più rapido rispetto a pannelli e granuli. Questo comportamento è attribuito a cambiamenti fisici che avvengono nella struttura porosa, modificandola, ciò è causato principalmente da aggressivi cicli di gelo-disgelo e soprattutto da elevati livelli di umidità [110]. Le simulazioni di U. Berardi [111] riportano al nono anno un abbassamento delle prestazioni termiche: l'invecchiamento del materiale porta a una variazione della conduttività termica di circa il 30% rispetto il valore di partenza, la conduttività risulta comunque inferiore rispetto molti materiali isolanti.

Recentemente sono stati commercializzati da un'azienda tedesca altri due prodotti contenenti aerogel. Si tratta di intonaci a base cemento e calce idrata a cui sono stati miscelati perlite e

aerogel: “Orbith 028” e “Orbith 036” che riportano valori di conduttività termica rispettivamente di 0,028 W/mK e 0,036 W/mK [112].

Resta sempre da tenere presente che essendo un materiale di nuova generazione è necessario portare avanti ricerche sempre più approfondite e mirate per studiarne il comportamento, specialmente quando applicato in situ, e a lungo termine.

Tabella 5 Termointonaci con Aerogel

rif	Legante	Aggregato	λ [W/mK]	
[108]	calce idraulica +cemento	Fixit 222	0,028	
[108]	calce idraulica +cemento	Fixit 224	0,048	
[113]	calce idraulica CHIRAEMA	Aerogel 25%	0,115	
[113]	calce idraulica CHIRAEMA	Aerogel 50%	0,069	
[113]	calce idraulica CHIRAEMA	Aerogel 70%	0,031	
[113]	calce idraulica Saint Astier	Aerogel 25%	0,123	
[113]	calce idraulica Saint Astier	Aerogel 50%	0,069	
[113]	calce idraulica Saint Astier	Aerogel 70%	0,030	
[100]	cemento	Aerogel 10%	0,51	
[100]	cemento	Aerogel 20%	0,46	
[100]	cemento	Aerogel 30%	0,37	
[100]	cemento	Aerogel 40%	0,29	
[100]	cemento	Aerogel 50%	0,23	
[100]	cemento	Aerogel 60%	0,152	
[102]	leganti minerali	Aerogel+fibre/altro 37°	0,016	
[104]	cemento	Aerogel 0,5%	0,394	
[104]	cemento	Aerogel 1%	0,282	
[104]	cemento	Aerogel 2%	0,133	
[104]	Cemento +pozzolana	Aerogel 0,5%	0,48	
[104]	Cemento +pozzolana	Aerogel 1%	0,38	

[104]	Cemento +pozzolana	Aerogel 2%	0,15	
[106]	gesso	Aerogel 80-90%	0,05-0,045	
[106]	gesso	Aerogel 91-95%	0,021-0,019	
[106]	gesso	Aerogel 96-99%	0,016-0,014	
[105]	cemento	Aerogel in polvere 5ml	0,17	
[105]	cemento	Aerogel in polvere 10ml	0,142	
[105]	cemento	Aerogel in polvere 15ml	0,086	
[105]	cemento	Aerogel in polvere 20ml	0,076	
[107]	cemento	Aerogel 60% +sughero20%+ argilla15% +perlite5%	0,084	
[107]	Cemento + ceneri volanti	Aerogel 60% +sughero20%+ argilla15% +perlite5%	0,097	
[112]	Cemento + calce idrata	Aerogel + perlite	0,028	
[112]	Cemento + calce idrata	Aerogel + perlite	0,036	

3.6. Analisi di mercato

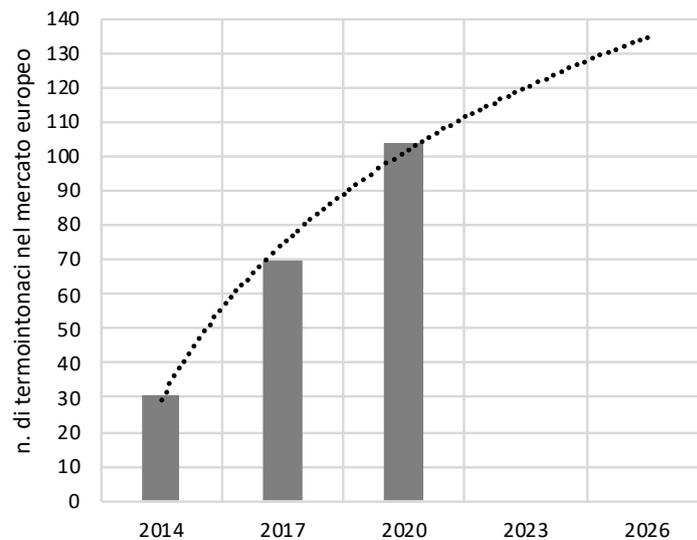
Le prime ricerche volte a valutare i requisiti necessari ad un intonaco termico per poter essere efficiente dal punto di vista del risparmio energetico e appetibile sul mercato per quello che riguarda la competitività economica, risalgono al 2014 [114]. Lo studio riporta le performance di 31 prodotti disponibili in commercio suddivisi in base la tipologia di aggregato leggero presente nella miscela [114].

Gli studi condotti nel lavoro di tesi [127], risalenti all'anno 2017, individuano sul mercato un totale di 70 intonaci termici. Si nota come la maggioranza dei prodotti sia costituita da aggregati di tipo minerale e polimerico, seguiti da quelli con aggregati di origine vegetale, l'aerogel risulta impiegato in una sola formulazione [127].

Altro lavoro di tesi magistrale [115] che si è concentrato sulle potenzialità di questi prodotti e quindi sulla loro commercializzazione, riporta 104 prodotti aventi le caratteristiche di intonaci isolanti.

Il Grafico 5 riporta i dati relativi il numero di termointonaci presenti sul mercato a partire dal 2014, sulla base dei dati campionati negli ultimi anni [115] fa una previsione di crescita che vede questo numero in continuo aumento nei prossimi anni.

Grafico 5 Numero di termointonaci presenti nel mercato europeo e tendenza per i prossimi anni

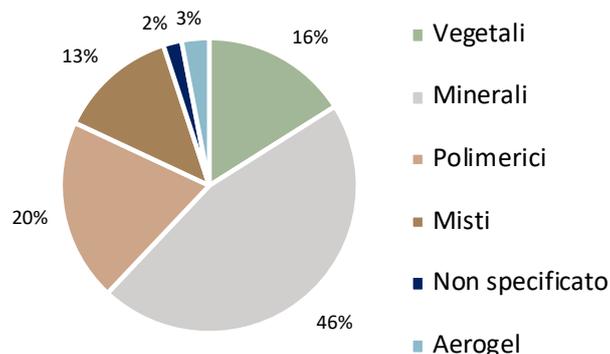


Questa ricerca del 2019 evidenzia come negli ultimi anni vi sia un interesse in costante crescita nei confronti di questo tipo di materiali per l'edilizia. In particolare gli intonaci contenenti aggregati minerali hanno visto un notevole sviluppo sia in termini prestazionali, sia per quello che riguarda il numero nuovi di prodotti formulati, che ad oggi rappresentano quasi la metà dell'offerta presente sul mercato [115]. Anche per quanto riguarda i termointonaci con aggregati artificiali e vegetali si nota un maggior numero di prodotti disponibili. La maggior parte di essi presenta rispettivamente EPS, e sughero [115], materiali economici vista la loro abbondanza e facilmente reperibili poiché ampiamente utilizzati anche in forma riciclata.

Al fine di ottimizzare le prestazioni termoigrometriche degli intonaci isolanti sono proposte anche formulazioni che vedono l'impiego di diverse tipologie di aggregato. È significativo infatti come l'azienda Dracholin abbia commercializzato due intonaci con perlite e aerogel granulare [112], in cui le ottime caratteristiche di isolamento ne potrebbero giustificare l'impiego.

Emerge in modo evidente come l'attenzione sempre maggiore rivolta ai materiali considerati super isolanti e alle loro nuove possibilità di impiego stia conquistando sempre maggior spazi in campo edilizio.

Grafico 6 Intonaci isolanti presenti sul mercato suddivisi in base la tipologia di aggregato [115] (rielaborazione grafica)



3.6.1. Conclusioni

La comparsa degli intonaci termici nel mercato dell'edilizia, caratterizzati da facilità di posa e di lavorabilità, spessori contenuti, adattabilità applicativa, ha permesso di risolvere con efficacia alcune delle problematiche da sempre connesse al tema del retrofit energetico. Laddove le tradizionali tecniche di isolamento, costituite principalmente da pannelli rigidi o materiali sfusi, non possono rappresentare una soluzione progettuale, gli intonaci termici costituiscono senza dubbio una valida alternativa. La risposta è stata quindi una richiesta crescente da parte del mercato dovuta alla versatilità del prodotto e all'effettiva capacità di riduzione dei consumi anche con spessori ridotti.

Vi sono ancora delle caratteristiche termoigrometriche e meccaniche che necessitano di essere migliorate ed altre che meritano di essere approfondite, come si è cercato di fare in questo lavoro, ma il futuro di questo tipo di materiali troverà sicuramente applicazione soprattutto nel caso di riqualificazioni energetiche di edifici storici e di pregio.

4. Analisi sperimentale

La prima parte del presente lavoro di tesi è incentrato sulla caratterizzazione delle proprietà termoigrometriche di diverse tipologie di intonaci che vedono l'uso di aggregati leggeri al posto di quelli tradizionali. L'obiettivo è quello di proporre nuovi materiali per l'edilizia caratterizzati da un elevato potere isolante. Per ottenere prodotti performanti dal punto di vista termico e meccanico, sono state testate diverse composizioni di intonaci contenenti aggregati di origine polimerica, di origine vegetale, minerale, in particolare perlite, materiali a cambiamento di fase ed aerogel. Questi nuovi materiali sono organizzati all'interno di un unico database contenente tutte le informazioni termo-igrometriche che li contraddistinguono.

Scopo dell'analisi sperimentale è completare questo database per riuscire a estrapolare delle valutazioni sulle prestazioni dei singoli materiali. Infatti modificando anche di poco la composizione o i quantitativi di aggregato si ottengono risultati molto diversi in termini prestazionali, l'obiettivo è ottimizzare la formulazione di prodotti innovativi e performanti, che possano essere appetibili sul mercato: è solo tramite il confronto delle proprietà caratteristiche e delle conseguenti simulazioni che si possono fare delle valutazioni su criticità e punti di forza dei diversi materiali.

Per ogni tipologia di materiale per l'edilizia vi sono norme e leggi che ne regolano le prestazioni e i possibili utilizzi, nel caso delle malte da intonaco è la norma UNI 998-1:2016 [15] che ne dà le definizioni e che illustra i test di laboratorio che è necessario condurre per caratterizzare questi materiali. Oltre a determinare le caratteristiche termoigrometriche e le prestazioni meccaniche delle malte, lo scopo dei test è anche quello di valutare se effettivamente quel materiale può essere considerato un intonaco per uso interno, per uso esterno, intonaco termico, e così via. Se i risultati dei test sono conformi a queste prescrizioni allora il materiale è assimilabile a quella determinata categoria. Nella seguente tabella sono riportati i test descritti nella normativa [15] e portati a termine durante il presente lavoro di tesi, con i relativi valori limite cui fare riferimento affinché un campione possa essere considerato un intonaco termico.

Tabella 6 Specifiche malte da intonaco secondo la UNI 998-1:2016 (Rielaborazione grafica)

Test parameter	Method of test	Requirements	Units
Dry bulk density	EN 1015-10	Declared range of value	[kg/m ³]
Capillary water absorption (for mortars intended to be used in external elements)	EN 1015-18	C ≤ 40	kg/(m ² min ^{0,5})
Water penetration after capillary water absorption test	EN 1015-18	-	-
Water vapour permeability coefficient (μ) (for mortars intended to be used in external elements)	EN 1015-19	≤ 15	-
Thermal conductivity mean λ _{10,dry} value	EN 1745:2012	T1: ≤ 0,10 T2: ≤ 0,20	[W/mK]

Oltre quelle richieste dalla normativa e riportate nella Tabella 6 sono state condotte le misure di calore specifico, di conduttività in funzione del contenuto d'acqua, di misura del coefficiente di assorbimento igroscopico.

Per questa prima parte di tesi il mio lavoro è stato volto nel determinare le caratteristiche dei termointonaci formulati; riporto i materiali analizzati e le loro diverse composizioni.

Tabella 7 Termointonaci analizzati

	Campione	Leganti	Aggregati
	A	Cemento	Aerogel 17% in volume
		Calce	Perlite 34% in volume
	B	Cemento	Aerogel 25% in volume
		Calce	Perlite 25% in volume
	C	Cemento	Aerogel 25% in volume
		Calce	Vetro granulare 25% in volume
	D	Cemento	Aerogel 50% in volume
		Calce	
	E	Cemento	Aerogel 50% in volume
		Calce	
	F	Cemento	Aerogel 24% in massa
		Calce	
	G	Cemento	Aerogel 24% in massa
		Calce	
	BioArtCork	Calce idraulica naturale	Fiocchi di cellulosa
			Sughero granulato
	Cork001	Calce idraulica naturale	Perlite+Zeolite 20% in massa
			Sughero+Paglia 25% in massa
	R1	Minerali	Perlite
			Sfere ceramiche
			Sfere di vetro espanso
			Aerogel
	R2	Minerali	Perlite
			Sfere ceramiche
			Sfere di vetro espanso
			Aerogel
	R3	Sintetici	Perlite
			Sfere ceramiche
			Sfere di vetro espanso
			Aerogel
	R4	Sintecici	Perlite
			Sfere ceramiche
			Sfere di vetro espanso
			Aerogel
	Int490	Minerali	Aerogel
	Int025	Minerai	Aerogel
	Ras024	Minerali	Aerogel

	Ras492	Minerali	Aerogel
	PCM23	Calce idraulica naturale	PCM incapsulato 14% in massa
		Gesso	
		Carbonato di calcio	
	PCM26	Calce idraulica naturale	PCM incapsulato 14% in massa
		Gesso	
		Carbonato di calcio	
	ThermoArg014	Calce idraulica naturale	Argilla
	ThermoBPL001	-	Minerali
	ThermoBPL004	-	Minerali
	ThermoBPL007	-	Minerali
	ThermoCalce	Cemento Portland	Perlite espansa 25% in massa
		Calce idraulica naturale	
	ThermoCalce014	Cemento Portland	Perlite espansa 30% in massa
		Calce idraulica naturale	
	ThermoCalce016	Cemento Portland	Perlite espansa 40% in massa
		Calce idraulica naturale	
	ThermoCalceNGV	Calce idraulica naturale	perlite 35% in massa
	Thermointonaco	Cemento Portland	EPS 6% in massa
		Calce idraulica naturale	
	VGT001	Calce idraulica naturale	Sughero granulare 10% in massa
			Perlite + Vermiculite espansa 41% in massa
	VGT014	Cemento Portland	Sughero granulare 10% in massa
		Cemento S-AL	Perlite + Zeolite + Vermiculite espansa 32% in massa
		Calce idraulica naturale	

4.1. Prove di laboratorio

4.1.1. Determinazione del contenuto di umidità tramite essiccazione a elevate temperature

Determinare il contenuto di umidità nei materiali per l'edilizia è fondamentale per calcolarne la densità e quindi i parametri termoigrometrici ad essa legati.

Si fa riferimento alla norma EN ISO 12570:2000 [116], che illustra l'essiccazione a elevate temperature, metodologia specifica per i materiali porosi e permeabili all'acqua.

4.1.1.1. Test

Prima di iniziare il test è necessario controllare che le superfici dei campioni siano pulite e sufficientemente piane, questo per ottenere misurazioni il più possibile precise.

La temperatura del laboratorio deve essere di $23 \pm 6 \text{ C}^\circ$, ed è necessario controllarla durante tutta la durata del test per non comprometterne i risultati.

Prima e dopo l'essiccamento in Camera Climatica è necessario pesare il provino con un'accuratezza dello 0,1% in massa e annotarne con precisione le dimensioni, così da determinare il volume con un margine di errore non superiore all'1%.

A seconda di che tipo di materiale si tratti cambia la temperatura di essiccamento, per gli intonaci si procede a 100 C° o nel caso in cui i leganti non siano costituiti esclusivamente da minerali, si procede a T ridotte, per evitare danni alla struttura del materiale. In questo caso è stata impostata una temperatura pari a 40 C° .

Il campione è quindi posto in forno, fatto essiccare e poi raffreddare. Quando si raggiunge un valore di massa costante solo quando dopo tre pesate consecutive a distanza di 24 ore l'una dall'altra, si verifica un cambio in massa inferiore allo 0,1% della massa totale.

Il materiale va pesato prima e dopo l'essiccamento.

Riusciamo quindi a calcolare:

- contenuto di vapore in massa

$$u = \frac{m - m_0}{m_0}$$

- contenuto di vapore in volume

$$\psi = u \cdot \frac{\rho_0}{\rho_w}$$

- contenuto di vapore massa in volume

$$w = u \cdot \rho_0$$

- densità a secco

$$\rho_0 = \frac{m_0}{V}$$

Figura 4: Camera climatica



4.1.1.2. Risultati e commenti

Obiettivo primario del test è quello di determinare i valori di densità a secco dei campioni, il Grafico 7 riporta i risultati ottenuti.

ThermoCalce, ThermoCalce014, ThermoCalce016, ThermocalceNGV, hanno come leganti cemento Portland e calce idraulica. Questi due componenti presentano come valori medi di densità rispettivamente 2200 e 1600 kg/m³ [117], la perlite espansa, aggiunta secondo diversi quantitativi nei vari campioni, ha una densità a secco di 90 kg/m³ [104]. Il valore finale di densità per ogni provino risulta fortemente influenzato dalla percentuale di aggregato miscelata: il ThermoCalce016 con il 40% in massa è infatti quello a ottenere il valore di densità inferiore, di 265 kg/m³.

I ThermoBPL004 e 007 hanno aggregati minerali ma anche in questo caso non sono specificate né le quantità né la tipologia di legante utilizzato. In particolare il campione 007 presenta un valore di densità analogo a quello di un intonaco tradizionale di calce o gesso (di 1500-1600 kg/m³). Considerati anche i risultati ottenuti dai test precedenti, in cui ad esempio i valori di conduttività termica risultano tra i più elevati, ritengo in questo campione vi sia una percentuale di aggregato molto più bassa rispetto agli altri campioni.

Anche il ThermoIntonaco è costituito da cemento Portland e calce idraulica, l'aggregato è l'EPS, che ha densità di 10 kg/m³. Anche se miscelato in quantitativi ridotti (6% in massa) porta ad un netto calo del valore finale di densità a secco, che risulta essere di 278 kg/m³.

Cork001, BioArtCork, VGT001 e VGT014 sono ottenuti dalla miscelazione di calce idraulica naturale e diverse tipologie di aggregati, tra cui sughero (con densità di 100 kg/m³), paglia, perlite, vermiculite ecc.. Anche in questo caso il valore finale di densità risulta direttamente correlato al quantitativo di aggregato leggero presente nel composto e alla sua tipologia.

Anche il campione di ThermoArg014 ha come legante la calce idraulica, l'aggregato è costituito da argilla espansa che presenta un valore di densità a secco di 350 kg/m³, valore più elevato rispetto a quello degli altri aggregati minerali. Ciò si traduce in un valore di densità finale dell'intonaco isolante di 585 kg/m³.

Gli AlmondPlaster sono caratterizzati oltre che dalla presenza di perlite espansa per circa il 27% in volume, dall'uso dei gusci di mandorla tritati come isolante. Questo seme ha una densità variabile tra i 350 e i 480 kg/m³ [118], anche se presente in piccole percentuali, si nota un leggero aumento dei valori finali di densità di questi campioni rispetto agli altri materiali costituiti sempre da calce idraulica e perlite.

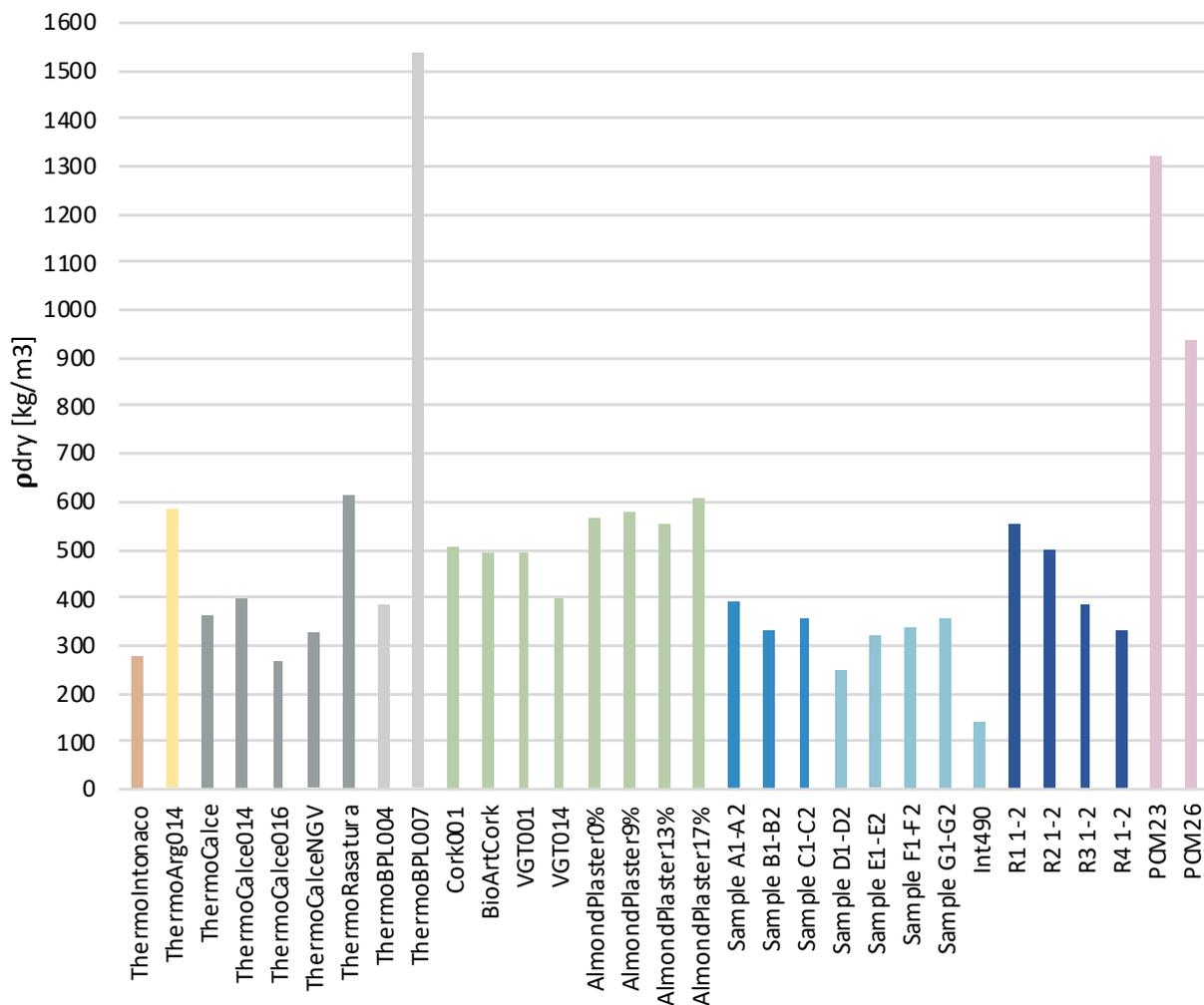
Le miscele A1-A2, B1-B2 e le seguenti sono costituite dalla stessa formulazione. I leganti impiegati in questi intonaci sono calce e cemento, i provini A, B, C sono costituiti poi da perlite e Aerogel, miscelati secondo quantitativi sempre diversi. Invece nei provini D, E, F, G la componente isolante è composta solo da Aerogel, per il 24% in massa. Notiamo come nonostante in questi provini vi sia un quantitativo inferiore di aggregato i valori di densità risultino comunque più bassi rispetto agli altri campioni, questo perché l'Aerogel, con la sua struttura porosa a celle chiuse è costituito per il 98% da aria e presenta valori di densità molto ridotti rispetto ai materiali tradizionali.

Questo è ancora più visibile se prendiamo in esame il campione di Int490: costituito da leganti minerali e Aerogel è quello a presentare come densità finale il valore più basso tra tutti i materiali studiati, di 140 kg/m³.

I campioni di termorasatura R1, R2, R3, R4, presentano le stesse tipologie di aggregato, perlite, sfere di vetro espanso, sfere ceramiche e aerogel, le differenze stanno nella tipologia di legante utilizzato. Infatti i primi due sono formati da leganti minerali e presentano valori di densità più elevati rispetto R3 ed R4 che invece hanno al loro interno leganti sintetici, caratterizzati in partenza da valori di densità più ridotti.

I due PCM presentano la stessa composizione ma i valori finali di densità riportano una modesta differenza. Questo può essere dovuto al fatto che la tipologia di PCM implementata non è la stessa nei due campioni e ciò potrebbe causare piccole variazioni nei valori finali dei test.

Grafico 7 Densità a secco dei materiali analizzati



4.1.2. Misura della conducibilità termica

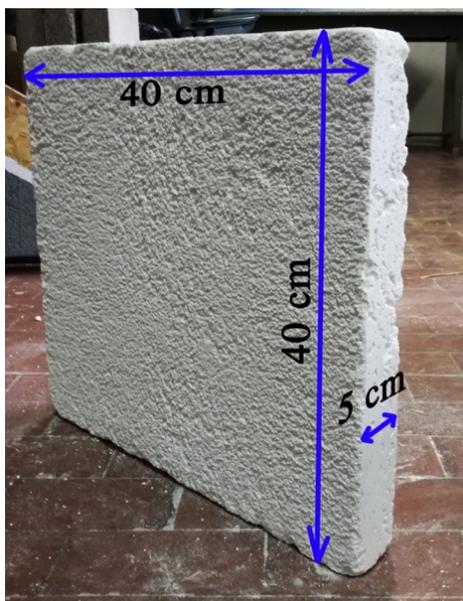
Con conducibilità termica si intende l'attitudine di un materiale a trasmettere calore, è il rapporto tra il flusso di calore e il gradiente di temperatura che provoca il passaggio del calore stesso. E' una proprietà termo-fisica che dipende dalla temperatura, dalla densità e dal contenuto di umidità.

Per misurare questa proprietà dei materiali isolanti (materiali con una resistenza termica medio-alta), si fa riferimento alla norma UNI EN 12664:2002 [119]. Essa illustra la metodologia del termoflussimetro (HFM), oggi la più utilizzata per misurare conducibilità termiche basse, in stato stazionario.

Oltre a determinare tale proprietà scopo del test è verificare che il materiale rispetti i parametri imposti dalla UNI 998-1:2016 l'intonaco per essere definito intonaco termico deve avere una conducibilità termica inferiore a 0,20 W/mK.

4.1.2.1. Test

Figura 5: Campione per la misura della conducibilità termica



Il campione da analizzare deve avere caratteristiche ben precise: di forma quadrata, il lato deve essere almeno 8 volte più grande del suo spessore, le facce devono essere perfettamente piane, regolari e parallele tra loro.

Il provino è posto all'interno dell'HFM composto da due piatti paralleli ognuno a temperatura isoterma, con dei termoflussimetri e delle termocoppie. Per ridurre la resistenza di contatto tra i piatti e il campione possiamo inserire dei materassini di gomma in corrispondenza dell'interfaccia, questo ci permette di ottenere misurazioni più precise.

Per il calcolo della conducibilità saranno poi sottratti i valori dei materassini.

La temperatura influenza i valori di conducibilità termica, si effettuano quindi le misure scaldando i due piatti a temperature differenti per valutare la trasmissione del calore attraverso il provino. I piatti sono impostati inizialmente alle temperature di 0° C - 20° C e ne è rilevato il flusso termico, le temperature sono poi innalzate a 15° C e 35° C e successivamente a 30° C e 50° C. Le misurazioni sono eseguite a temperature differenti poiché come accennato precedentemente è necessario capire se variando range di temperatura il valore della conducibilità termica varia e quindi viene influenzato dalle condizioni esterne o se rimane costante.

Anche l'umidità può influenzare le performance termiche dei materiali; le misurazioni vanno quindi portate avanti o con i campioni essiccati, con campioni ad umidità relativa controllata o in condizioni di saturazione. I campioni sono fatti essiccare in forno a 105° C e possono essere considerati secchi quando la variazione di peso tra una misurazione e l'altra a distanza di 24 ore è inferiore a 0,1 kg/mc, cioè quando il materiale ha raggiunto l'equilibrio. Questo criterio è quello richiesto e che deve essere verificato anche quando le misurazioni sono effettuate su campioni condizionati ai determinati valori di umidità.

Sia i campioni secchi che quelli umidi durante lo svolgimento del test, sono sigillati dentro degli involucri di materiale plastico ad umidità relativa definita affinché l'umidità dell'ambiente esterno non influenzi quella del materiale da analizzare.

Per trovare il valore della conduttività λ [W/mK] si parte dall'equazione di Fourier:

$$q = \frac{\Delta T}{(x/\lambda)} \text{ [W]}$$

q è il flusso di calore passante attraverso il provino [W],

ΔT è la differenza di temperatura tra i due piatti [K],

x lo spessore del provino [m],

4.1.2.2. Risultati e commenti

Il Grafico 8 riporta i valori di conduttività termica a secco di tutte le nuove formulazioni studiate presso i laboratori del Politecnico di Torino.

I campioni contenenti aggregati di origine minerale, riconoscibili nel grafico tramite il colore grigio, presentano caratteristiche diverse tra loro. I ThermoCalce sono costituiti leganti idraulici e cemento Portland e come aggregati da Perlite espansa in quantitativi sempre maggiori: 25% in massa nel ThermoCalce, 30% nel ThermoCalce014, 35% nel ThermoCalceNV. E' significativo notare come sia sufficiente aggiungere il 5% di materiale isolante in più per avere delle considerevoli diminuzioni di conduttività: il campione di ThermoCalce014 subisce infatti una diminuzione di conduttività rispetto al ThermoCalce del 70%. All'aumentare del quantitativo di aggregato la riduzione dei valori di conduttività risulta pari al 20% per il campione di ThermoCalce NV e per il ThermoCalce016. Non sono note le esatte composizioni dei ThermoBPL; tra quelli analizzati il campione 007 è l'unico materiale a non rispettare i requisiti per essere considerato un intonaco isolante.

I provini indicati nel grafico con il colore verde sono costituiti da miscele differenti di leganti e di aggregati, questi in particolare sono: sughero, paglia, cellulosa di origine vegetale e perlite,

zeolite, vermiculite, di origine minerale, presenti in diverse percentuali. Il BioArtCork è l'unico tra questi ad appartenere alla tipologia di intonaci isolanti T2, con una conduttività termica a secco di 0,106 W/mK. Esso infatti presenta un quantitativo di aggregato leggero (26% in massa) decisamente inferiore rispetto agli altri campioni, in cui varia dal 42% al 51% in massa. Nonostante tra il campione BioArtCork e il Cork001 ci sia una differenza di quantitativo di isolante notevole, il valore di conduttività termica di quest'ultimo, non subisce una diminuzione così rilevante. Ciò probabilmente si deve alla tipologia di aggregato: i fiocchi di cellulosa presentano una conduttività termica di 0,032 W/mK, i valori di conduttività del sughero granulato variano da 0,042 a 0,06 W/mK, questo vuol dire che basta un minor quantitativo di materiale isolante nella miscela per raggiungere prestazioni termiche analoghe.

I campioni di VGT presentano una componente di aggregato minerale in quantitativi decisamente maggiori. Notiamo come nella formulazione del VGT001 vi sia il 41% in massa di isolante minerale, contro il 32% nel VGT014, ciò nonostante i risultati più performanti dal punto di vista termico sono quelli riscontrati nel campione VGT014, con valori di conduttività termica di 0,083 W/mK. In questo caso un ruolo determinante è svolto dai leganti: calce idraulica naturale, cemento Portland e cemento con loppa d'altoforno, risultano una combinazione più idonea per essere miscelata con questo tipo di isolanti.

Gli intonaci che presentano al loro interno materiali a cambiamento di fase, PCM23 e PCM26, ricadono nella topologia T2 in quanto la loro conduttività risulta essere \leq a 0,20 W/mK. Composti da calce idraulica naturale e gesso hanno al loro interno un quantitativo di aggregato del 14% in massa, percentuale decisamente inferiore rispetto agli altri campioni analizzati. Aggiungendo anche di poco il quantitativo di PCM si possono migliorare le performance termiche.

Il campione di ThermoIntonaco è l'unico tra queste nuove formulazioni, ad avere al suo interno aggregato di tipo polimerico. Costituito da cemento Portland, calce idraulica naturale ed EPS per il 6% in massa, ha conduttività termica di 0,085 W/mK. Il polistirene espanso ha λ di 0,031 W/mK, l'utilizzo di questo materiale risulta particolarmente conveniente in quanto oltre ad essere presente in abbondanza sul mercato, bastano quantitativi ridotti per ottenere malte con delle ottime caratteristiche di isolamento.

Anche il ThermoArg014 costituito da calce idraulica e argilla espansa ricade nella tipologia di intonaci isolanti T1 in quanto ha conduttività termica a secco di 0,091 W/mK. Non sappiamo il quantitativo esatto di isolante presente all'interno della miscela, ma è significativo il fatto che questo materiale abbia una λ di 0,09 W/mK, quindi le caratteristiche di isolamento dell'intonaco hanno raggiunto risultati soddisfacenti che difficilmente potranno essere migliorati, a meno che non si preveda l'aggiunta di diverse tipologie di aggregato.

I campioni indicati con il blu scuro presentano come tipologie di aggregato perlite, sfere ceramiche, sfere di vetro espanse e Aerogel. Le differenze stanno nella tipologia di legante: i provini denominati R1 e R2 sono composti da leganti minerali, e come è evidenziato dal grafico rientrano nella categoria T2, i provini R3 e R4 invece sono composti da leganti di origine sintetica e fanno parte della categoria T1 in quanto i loro valori di conduttività termica non superano i 0,01 W/mK. Queste differenze prestazionali risultano assolutamente prevedibili in quanto gli intonaci a base sintetica partono da valori di conduttività termica più contenute rispetto gli intonaci tradizionali a base minerale.

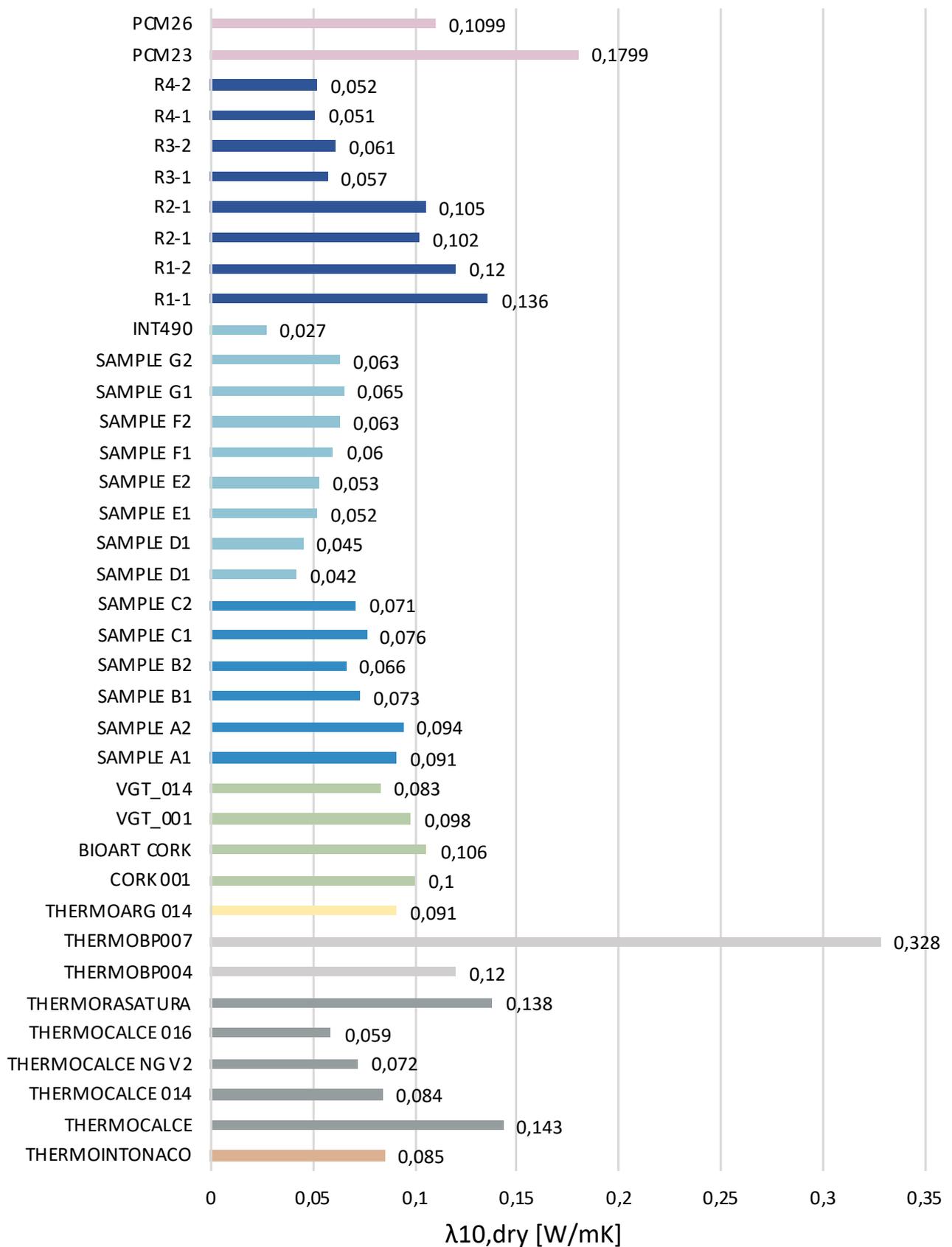
Inoltre è importante chiarire che per ogni formulazione (R1, R2, R3, R4) sono stati analizzati due campioni e questo perché come abbiamo visto vi sono numerosi fattori che influenzano i valori finali di conduttività delle malte, tra cui le imperfezioni, la stesura del materiale ecc.. Questo risulta evidente se ad esempio confrontiamo i valori di R3-1 e R3-2 che nonostante siano generati dalla stessa identica miscela, presentano valori finali di conduttività leggermente differenti.

I provini A, B, C, sono formati da calce, cemento e come aggregati Aerogel, Perlite e vetro granulare, miscelati in volume secondo quantitativi diversi. Il Sample A è quello a contenere la minor percentuale di Aerogel (17%), il Sample B e Sample C ne contengono per il 25% in volume. La differenza tra questi ultimi due campioni sta nella seconda tipologia di aggregato inserito, perlite e vetro granulare, entrambi per un quantitativo del 25%. A livello prestazionale si notano differenze minime, comunque i risultati migliori sono stati ottenuti dal campione B2, composto quindi dalla miscela di Aerogel e perlite.

I campioni D, E, F, G, presentano tutti la medesima composizione: calce, cemento e Aerogel per un quantitativo del 50% in volume. E' evidente come aumentando il quantitativo del super isolante si assista ad una drastica riduzione della conduttività termica: tra il campione B e il campione D si assiste ad una riduzione di conduttività del 60% dovuta al raddoppio del quantitativo di aerogel presente. Tutte queste formulazioni ricadono quindi nella tipologia di malte T1 indicata dalla norma UNI 998-1:2016.

Il campione di Int490, composto da leganti minerali e Aerogel, presenta il valore di conduttività termica a secco più basso tra tutti i materiali analizzati presso il laboratorio universitario.

Grafico 8 Conduttività termica a secco dei campioni analizzati



Il Grafico 9 riporta i valori di conduttività termica dei campioni in condizioni di saturazione, sull'asse secondario è indicato il contenuto di acqua presente all'interno del materiale in kg/m^3 . Per poter confrontare e analizzare puntualmente questi dati viene inoltre indicata la variazione percentuale di conduttività rispetto al campione secco e il valore di conduttività termica a secco di ciascun materiale.

Il Cork001 ha il valore di conduttività termica in condizioni di saturazione più elevato tra i materiali analizzati, di $1,3 \text{ W/mK}$. Questo esponenziale aumento di conduttività, del 92%, è dovuto alla componente di origine vegetale, il sughero ed in particolare la paglia, che presenta caratteristiche di igroscopicità e quindi risente in modo significativo della presenza di acqua. Ciò appare ancora più evidente guardando il quantitativo d'acqua presente all'interno: 361 kg/m^3 , che anche in questo caso risulta essere uno dei valori più elevati. Anche il campione di VGT001 ha al suo interno aggregato di origine vegetale ma in quantitativi decisamente inferiori: l'aumento della λ non porta a valori critici, anzi tra i campioni analizzati resta uno dei più contenuti con $0,31 \text{ W/mK}$ che corrisponde ad un incremento di circa il 69%. Anche l'acqua presente all'interno non raggiunge quantitativi elevati, con 190 kg/m^3 è uno dei materiali meno soggetto all'accumulo d'acqua.

Per quanto riguarda i campioni di ThermoCalce notiamo un incremento di conduttività termica direttamente proporzionale al quantitativo di isolante presente nei provini. Il ThermoCalce contenente una percentuale minore di perlite espansa presenta un incremento di conduttività del 63% contro il 69% del ThermoCalce014.

Il BPL007 presenta un valore di conduttività termica a secco già in partenza più elevato rispetto tutti gli altri materiali, in condizioni di saturazione si assiste all'aumento del 33% di questo parametro, che arriva a $0,49 \text{ W/mK}$. Il contenuto d'acqua presente all'interno è assimilabile a quello degli altri campioni costituiti da leganti come calce e cemento.

Come visto precedentemente la differenza tra i campioni R2 e R4 sta nella tipologia di leganti utilizzato, anche in questo grafico si nota come l'utilizzo di leganti minerali o sintetici influenzi in modo significativo il comportamento delle malte. Sebbene i valori di conduttività a secco e bagnati non si distacchino molto l'uno dall'altro, il contenuto di acqua nella miscela R2 (228 kg/m^3) risulta addirittura quattro volte maggiore rispetto il campione R4 (52 kg/m^3) e questo perché i leganti di origine minerale sono più soggetti all'accumulo d'acqua rispetto a quelli sintetici che come sappiamo hanno caratteristiche idrofobe. Ciò si traduce in un aumento di conduttività pari al 74% per il campione R2 e al 61% per il campione R4.

Per gli altri materiali contenenti Aerogel (Sample D, F, G, Int490) si assiste ad un aumento di conduttività che risulta comunque contenuto se paragonato agli altri campioni, con valori che non superano i $0,20 \text{ W/mK}$. In condizioni di saturazione l'Int490 presenta un incremento di

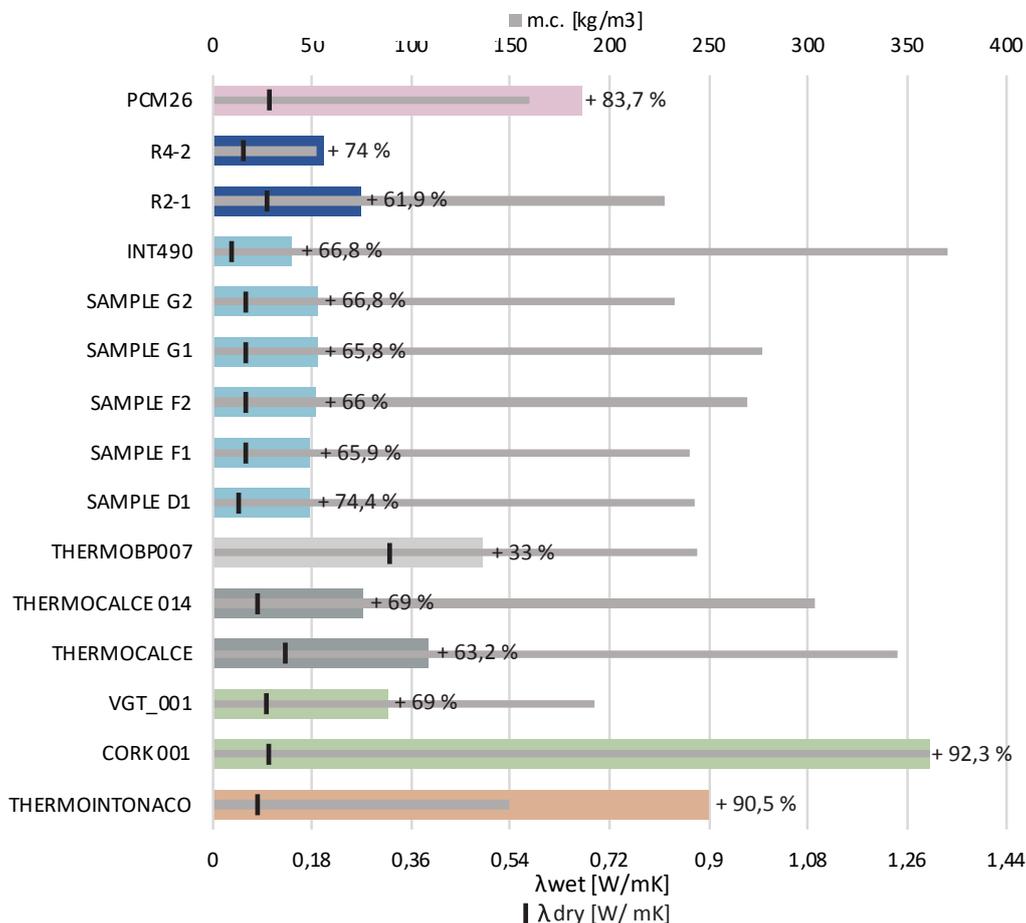
conduttività del 66,8%, valore in linea con quello degli altri campioni. E' interessante notare come anche in presenza di umidità elevata la conduttività si mantenga entro i valori dichiarati dalla UNI EN 998-1:2016 [15], ciò significa che anche nelle condizioni più critiche questa formulazione mantiene le caratteristiche di isolamento.

Il contenuto d'acqua presente nei Sample D,F,G, varia leggermente, da un minimo di 230 a 270 kg/m³, come accennato precedentemente queste differenze risultano del tutto naturali in quanto ogni campione presenta piccole imperfezioni o diverse modalità di stesura. Tra quelli analizzati è il provino di Int490 a presentare il più elevato quantitativo di acqua con 370 kg/m³, valore addirittura più elevato del Cork001. Nonostante questo consistente accumulo d'acqua il valore di conduttività di questo materiale risulta il più basso tra quelli analizzati in condizioni di saturazione.

Il campione di Thermolntonaco nonostante presenti un contenuto d'acqua contenuto, di 149 kg/m³, subisce un notevole incremento di conduttività. Ciò probabilmente è dovuto alla componente dei leganti in quanto l'EPS è un materiale impermeabile.

Tra quelli analizzati il PCM26 è uno dei materiali a risentire maggiormente della presenza di acqua. Notiamo infatti un notevole incremento della conduttività termica, che arriva 0,67 W/mK, nonostante il contenuto di acqua all'interno sia uno dei più ridotti.

Grafico 9 Conduttività termica dei campioni bagnati e contenuto d'acqua



4.1.3. Misura del calore specifico

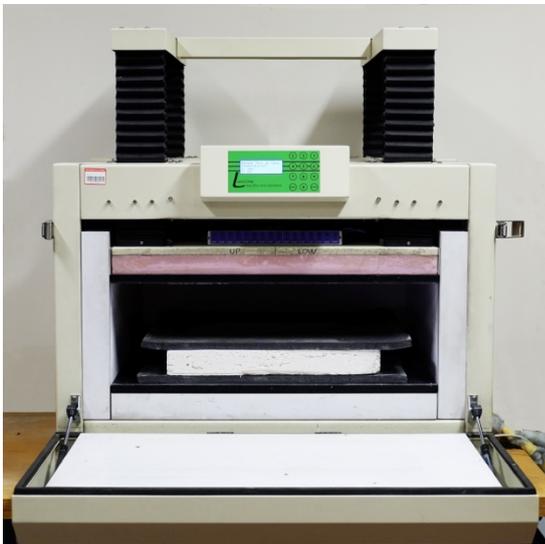
Il calore specifico è una proprietà intensiva caratteristica di ogni sostanza e si definisce come l'energia necessaria per far innalzare di 1 C° la temperatura di 1 kg di massa di materiale [120]. Dipende dalla densità e dalla composizione stessa del materiale ed è fondamentale per determinarne la capacità di accumulo termico. Lo strumento utilizzato per calcolarlo è il termoflussimetro, stesso macchinario utilizzato per il calcolo della conducibilità termica.

4.1.3.1. Test

Figura 6 Preparazione dei campioni per il test di calore specifico e conducibilità termica



Figura 7: Heat Flux Meter [121]



A seconda del tipo di materiale da analizzare la norma, UNI EN 1946-3:2004 [122] riporta le diverse metodologie e temperature a cui eseguire i test. Il test comincia dopo che il campione è stato portato a 15° C successivamente si porta lo stesso a 25° C misurando i flussi di calore generati, che risultano proporzionali al flusso di calore entrante o uscente dalle due facce del provino. Moltiplicando la sommatoria di queste differenze di flusso termico per l'intervallo di tempo tra le misurazioni otteniamo il calore totale assorbito dall'intonaco (H).

Per trovare il calore specifico del materiale:

$$C_p = \frac{H}{s \cdot \rho \cdot \Delta T} \quad \left[\frac{J}{kg \cdot K} \right]$$

S e ρ sono rispettivamente lo spessore [m] e la densità [kg/m³] del provino

ΔT è la differenza di temperatura impostata inizialmente [K]

Conoscere la conducibilità termica e il calore specifico di un dato materiale ci permette di scoprire altre due proprietà fondamentali:

- Diffusività termica (a): caratterizza la conduzione non stazionaria del calore, è una proprietà molto utile per capire quanto rapidamente un materiale reagisce ad una variazione di temperatura

$$a = \frac{\lambda}{C_p \cdot \rho} \quad \left[\frac{m^2}{sec} \right]$$

- Effusività termica (ε): rappresenta l'abilità di un materiale di scambiare energia termica con l'ambiente circostante ed è il rapporto tra la conduttività termica di un materiale e la radice quadrata della sua diffusività termica

$$\varepsilon = (\lambda \cdot C_p \cdot \rho)^{1/2}$$

4.1.3.2. Risultati e commenti

Tabella 8 Calore specifico dei materiali analizzati

Campione	CP [J/kg K]
AlmondPlaster 0%	850
AlmondPlaster 9%	964
AlmondPlaster 13%	1015
AlmondPlaster 17%	1059
BioArtCork	993
Cork001	988
Int490	998
PCM23	1000
PCM26	1085
ThermoBPL007	1000
ThermoCalce	850
ThermoCalce014	850
ThermoCalce016	850
ThermoCalceNGV	850
ThermoIntonaco	889
VGT001	975
VGT007	975
VGT014	975

La Tabella 8 riporta i risultati ottenuti per i materiali analizzati.

I campioni ThermoCalce, ThermoCalce014, ThermoCalce016, ThermoCalceNGV, sono costituiti da calce idraulica naturale e cemento Portland, l'aggregato è la perlite espansa presente in diversi quantitativi nei vari materiali. Nonostante queste differenze nella composizione della miscela tutti e quattro i materiali riportano un valore di calore specifico di 850 J/kg K.

Discorso analogo per i campioni di VGT001, VGT007 e VGT014, che presentano al loro interno diverse tipologie di aggregato, di origine vegetale e minerale, secondo diversi quantitativi percentuali nei vari campioni. E' quindi la componente dei leganti a determinare il calore specifico di 975 J/kg K per questi campioni, costituita da calce idraulica naturale, cemento Portland e cemento S-AL.

I materiali a cambiamento di fase miscelati come parte di aggregato nei campioni di PCM23 e PCM26 e sono le sostanze che riescono meglio ad immagazzinare il calore. Quando aggiunti per il 14% in massa restituiscono malte con valori di cp rispettivamente di 1000 e 1085 J/kg K.

Altro caso significativo è quello dei provini contenenti come aggregato i gusci di mandorle. Le percentuali indicate negli Almond Plaster indicano proprio il quantitativo di aggregato derivante dalle mandorle presente nell'isolante: aumentandone il contenuto in massa aumenta rispettivamente il calore specifico dell'intero campione. Diversi studi si sono concentrati sulle potenzialità di questi semi che presentano un elevato calore specifico, di 2200 J/kg K [123], risulta quindi evidente come basti modificare anche in minima parte i quantitativi di questa particolare tipologia di isolante per ottenere caratteristiche prestazionali differenti.

I campioni di BioArtCork e Cork001 presentano, come abbiamo visto, aggregati di origine differenti e in diversi quantitativi, il legante utilizzato è la calce idraulica naturale. Anche per questa tipologia di materiali a determinarne il calore specifico è la componente dei leganti: i due campioni infatti presentano una differenza minima per il valore di c_p , sintomo che questa tipologia di isolanti non influisce in modo significativo nella determinazione dello stesso.

Il ThermoIntonaco, caratterizzato dalla presenza di EPS, è costituito principalmente da cemento Portland e calce idraulica. Otteniamo un valore di calore specifico di 889 J/kg K, valore perfettamente in linea con quello degli altri intonaci costituiti dallo stesso tipo di leganti.

L'Int490, ottenuto tramite la miscelazione di leganti minerali ed Aerogel, presenta un valore di c_p assimilabile a quello degli intonaci isolanti con tipologie di aggregato più tradizionali.

4.1.4. Misura del coefficiente di assorbimento igroscopico

L'igroscopia è la capacità di un prodotto di assorbire le molecole d'acqua presenti nell'ambiente circostante [120] ed è fondamentale nell'edilizia poiché descrive l'attitudine di un materiale ad assimilare l'umidità.

Parliamo di curve di assorbimento quando il test è condotto con dei livelli di umidità crescenti, sono dette curve di desorbimento quando l'umidità viene fatta variare in modo decrescente; la diversa risposta del materiale alla variazione di umidità è detta isteresi e può portare ad avere due grafici differenti.

Per misurare questa proprietà facciamo riferimento alla norma UNI EN ISO 12571:2013 [124] che illustra il metodo del Desiccatore e il metodo della Camera climatica, quest'ultimo è quello utilizzato e descritto.

4.1.4.1. Test

Il campione deve essere esplicitivo del prodotto che rappresenta e, per i materiali con densità minore di 300 kg/m^3 , deve avere un'area di almeno $100\text{mm} \times 100\text{mm}$.

Figura 8 Campione per il test di assorbimento igroscopico [102]

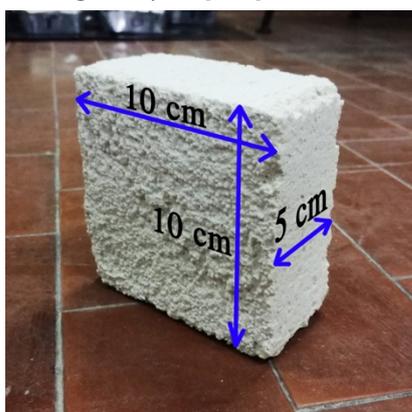


Figura 9 Camera climatica con i campioni in misura [102]



Come primo passaggio esso è essiccato in camera climatica e quando raggiunge massa costante, cioè quando dopo tre pesate consecutive il suo cambio in massa è inferiore allo 0,1% della massa totale. Qui la temperatura è fissa a 23 C, l'umidità invece è settata affinché aumenti gradualmente.

La norma specifica che per gli intonaci è necessario analizzare un minimo di 4 punti di umidità relativa differenti e riporta diversi range di umidità (dal 30% al 95%) a cui effettuare le misurazioni. Settiamo il valore iniziale di umidità relativa al 55%, se dopo tre pesate consecutive, fatte a 24 ore di distanza l'una dall'altra, il cambio in massa del campione è minore dello 0,1% della massa totale, vuol dire che il provino ha raggiunto una condizione di equilibrio e si può passare al livello

di umidità relativa successivo. Si procede in questo modo con i valori di umidità relativa scelti, in questo caso del 70%, 80%, 90% fino a raggiungere un'umidità relativa del 95%.

Questi valori sono scelti arbitrariamente, a seconda del loro utilizzo; ad esempio abbiamo ritenuto utile svolgere le misurazioni con l'80% di umidità poiché è uno dei parametri che ci richiede il software di calcolo termodinamico Wufi.

Ottenuto l'equilibrio per ogni valore di umidità si può calcolare u (contenuto di umidità),

$$u = \frac{m - m_0}{m_0} \quad \left[\frac{\text{kg}}{\text{kg}} \right]$$

m è la massa del campione alla data umidità,

m_0 è la massa iniziale, cioè la massa del campione completamente essiccato

Per ottenere le curve isoterme di assorbimento dell'umidità si devono interpolare i valori di u (asse delle ordinate) con i corrispondenti valori di umidità relativa (asse delle ascisse).

4.1.4.2. Risultati e commenti

Il Grafico 10 e il Grafico 11 a seguire riportano le curve di assorbimento dell'umidità dei materiali testati.

Le curve relative i campioni contenenti aggregato di origine minerale presentano tutte lo stesso andamento: in condizioni di umidità relativa inferiore all'80% il contenuto di acqua all'interno dei materiali si mantiene molto basso. Superando questa soglia di umidità la curva assume un andamento decisamente più ripido, ciò significa che il materiale diventa più soggetto all'accumulo d'acqua. Comunque per tutti e tre i campioni il valore di u non supera i 0,045 kg/kg, che si traduce in un aumento in peso del 4,5%.

Comportamento analogo per il campione di ThermolIntonaco, anche in condizioni di umidità relativa elevate il contenuto d'acqua rilevato interamente mantiene valori contenuti.

Il VGT001 e il BioArtCork riportano gli stessi valori di contenuto di acqua fino a quando in ambiente vi è un'umidità relativa dell'80%, notiamo un ampio distacco tra le due curve quando si arriva ad un valore di umidità del 90%. Il Cork001 invece dimostra una maggiore permeabilità già dal primo punto di misura, per un valore di umidità del 95% si ottengono valori di contenuto d'acqua di 0,115 kg/kg, il doppio rispetto il quantitativo riscontrato nel VGT001. Vi è una correlazione diretta tra quantitativo di aggregato vegetale presente nei provini e acqua assorbita dagli stessi: per il VGT001 la componente sughero granulare rappresenta il 10% della massa, per il Cork001 il 25%.

Per quello che riguarda il provino costituito da materiale a cambiamento di fase la curva segue l'andamento medio riportato da tutti i campioni, con il valore massimo di 0,1 kg/kg al 95% di R.H.

I Sample A e B, presentano per tutti i punti di misura i medesimi valori di contenuto d'acqua. In condizioni di elevata umidità relativa sono tra i materiali ad assorbire maggiormente l'umidità presente in ambiente: il grafico mostra chiaramente come la curva assuma un andamento decisamente più ripido per valori superiori all'80% di umidità relativa. Diverso è il caso del Sample C, costituito da Aerogel e vetro granulare, presenta contenuti di acqua più ridotti con un massimo di 0,085 kg/kg al 95% di umidità relativa rispetto i campioni A e B, che riportano valori di 0,125 kg/kg. Ciò significa che l'utilizzo del vetro granulare al posto della perlite espansa comporta un minore assorbimento di umidità da parte dell'intonaco e questo rappresenta uno spunto interessante per approfondire la ricerca verso formulazioni simili.

I sample D, E, F, G, caratterizzati dalla presenza di Aerogel per il 24% in massa, riportano valori coerenti tra loro per ogni livello di umidità relativa a cui sono state effettuate le misurazioni. Le differenze riscontrate dipendono, come accennato più volte, da errori casuali e non sistematici quali piccole discontinuità materiche, imperfezioni nei provini ecc..

Dei campioni R1, R2, R3, R4, non conosciamo i quantitativi esatti di aggregato presenti all'interno, sono costituiti da aggregati minerali e Aerogel. R1 ed R2 presentano leganti minerali e riportano curve di assorbimento analoghe, piccole differenze sono state riscontrate nelle misurazioni effettuate al 55 e 70% di umidità relativa. I campioni R3 ed R4 presentano leganti sintetici ed anche in questo caso non vi sono differenze evidenti tra i due. A risentire maggiormente della presenza di umidità è però il provino R4 che al 95% di R.H. riporta uno dei valori di contenuto d'acqua più alto tra i materiali analizzati, di 0,122 kg/kg.

Nel campione Int490 con un'umidità relativa del 55% si rileva all'interno un quantitativo d'acqua di 0,038 kg/kg, valore che per diversi campioni rappresenta il contenuto massimo rilevato. Anche le misure effettuate al 70 e 80% di umidità relativa si distaccano nettamente da quelle degli altri campioni, al 95% di R.H. si arriva ad un contenuto d'acqua di 0,145 kg/kg. E' possibile quindi affermare che tra quelle analizzate la formulazione dell'Int490 è quella a risentire maggiormente delle variazioni di umidità in ambiente.

Grafico 10 Curve di assorbimento dell'umidità dei materiali analizzati contenenti aggregati tradizionali

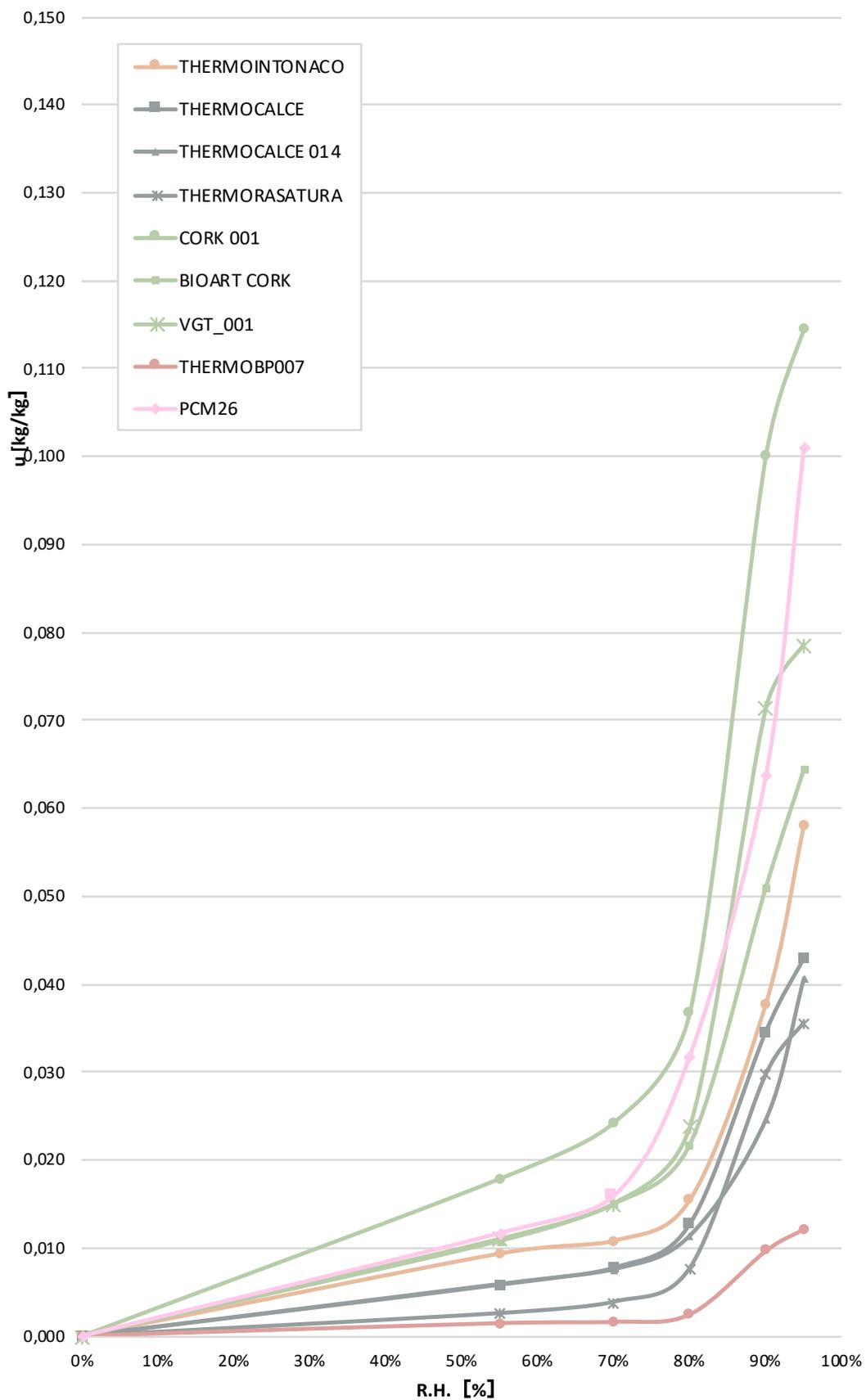
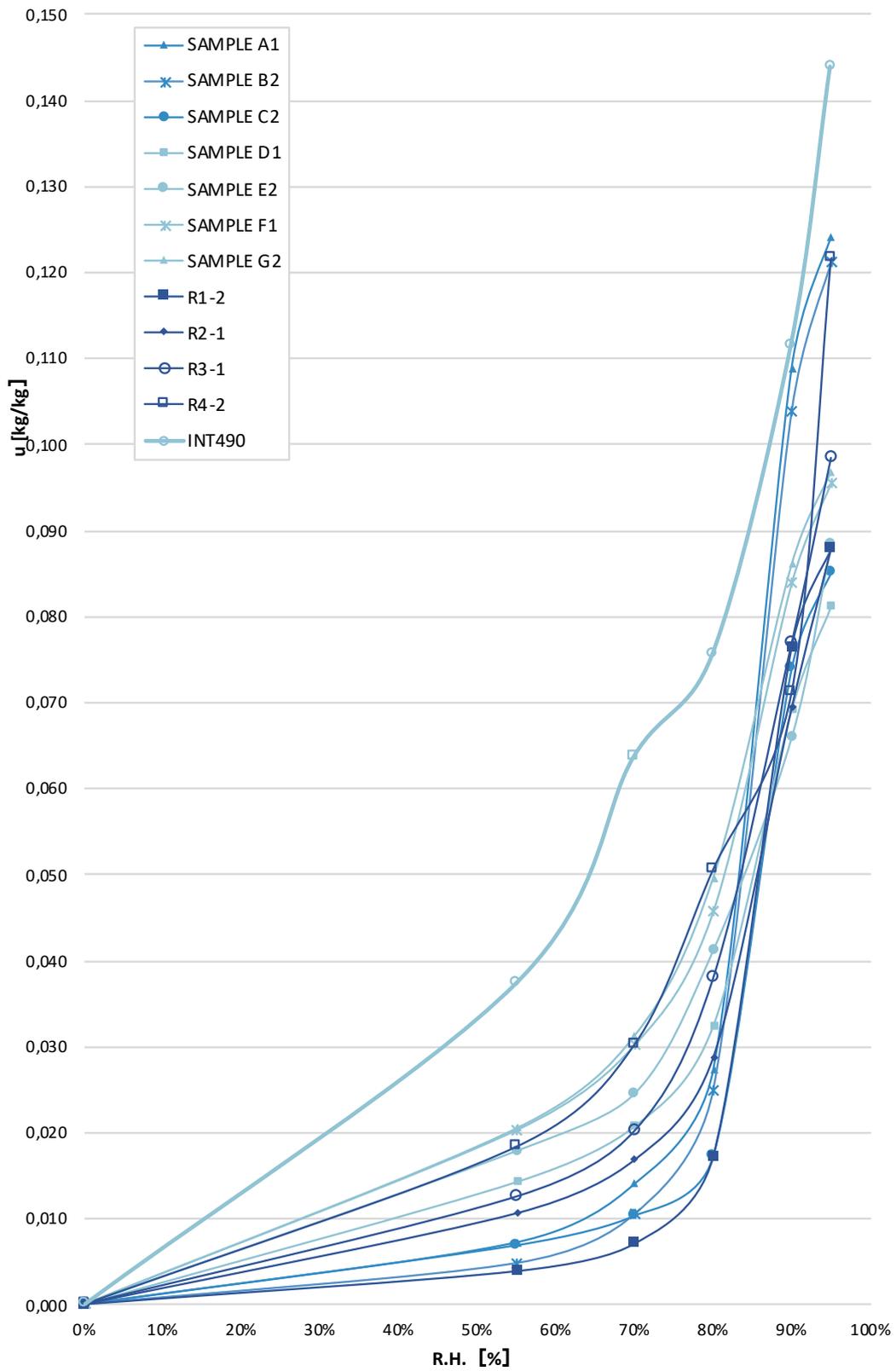


Grafico 11 Curve di assorbimento dell'umidità dei materiali analizzati contenenti aerogel



4.1.5. Misura del coefficiente di permeabilità al vapore acqueo

Il coefficiente di permeabilità al vapore acqueo indica quanto, a parità di spessore e di temperatura, la resistenza al passaggio del vapore di un materiale sia superiore a quella dell'aria. Viene quindi definito come quantità di vapore acqueo che attraversa, per unità di tempo e per unità di superficie, una sostanza quando vi è una differenza di pressione e temperatura tra le due facce del materiale. Per l'aria $\mu = 1$, per un intonaco generico composto da calce e cemento il valore di permeabilità al vapore si aggira attorno a 15, per le rasature in gesso μ è circa 6. Le fibre vegetali hanno una permeabilità vicina a quella dell'aria, che varia tra 1,2 e 2, per i materiali isolanti come poliuretano e polistirene questo parametro presenta valori decisamente più alti, può arrivare fino a 210, un foglio di alluminio invece presenta una resistenza al passaggio del vapore praticamente infinita.

Per misurare questa proprietà dei materiali da costruzione facciamo riferimento alla norma UNI EN ISO 12572:2016 [125]. Affinchè l'intonaco possa dirsi termico deve soddisfare i requisiti della UNI 998-1:2016 che prevedono un valore del coefficiente di permeabilità al vapore acqueo inferiore a 15.

4.1.5.1. Test

Il provino dovrà avere spessore corrispondente a quello del materiale quando applicato e una superficie di esposizione di almeno $0,005 \text{ m}^2$ e le due facce, superiore e inferiore non devono differenziarsi di più del 3%.

Figura 10: Preparazione dei provini per eseguire il test di permeabilità al vapore acqueo [102]



Come primo passaggio il campione viene tagliato e sigillato da un lato in un contenitore; è necessario prestare molta attenzione poiché deve essere perfettamente tappato per evitare che l'acqua evapori da altri punti e non solo attraverso il provino. Il recipiente è infatti riempito con una soluzione acquosa: usiamo il nitrato di potassio, dosato e accuratamente miscelato con acqua, per rendere saturo l'intercapedine d'aria all'interno della vaschetta che arriva così ad una

umidità relativa del 95%. Questa soluzione all'interno del recipiente deve avere una profondità minima di 15mm, altri 15 +/- 5 mm sarà lo spazio d'aria tra il provino e la soluzione.

Il provino così confezionato è posto all'interno della camera climatica impostata ad una temperatura di 23 °C e ad un'umidità relativa del 50% per eseguire il test in condizioni asciutte, al 93% di umidità relativa per eseguire il test in condizioni di saturazione.

A causa della differenza di pressione di vapore tra la camera climatica e l'interno del recipiente, si crea un flusso di vapore che permea nel campione. Ogni provino viene quindi giornalmente pesato per capire quanta umidità ha assorbito il materiale, il test si può ritenere concluso quando le ultime cinque misure differiscono per meno del 5% rispetto al valore medio.

Per ogni pesata calcolo il cambio in massa:

$$\Delta m_{12} = \frac{m_2 - m_1}{t_2 - t_1} \left[\frac{kg}{sec} \right]$$

Calcolo poi G cioè la portata di vapore acqueo attraverso il campione, partendo dalle ultime 5 pesate che hanno un Δm_{12} variabile al massimo del +/- 5%.

Con questi dati posso poi trovare la permeanza al vapore:

$$W = \frac{G}{A \Delta p} \left[\frac{kg}{m^2 \cdot sec \cdot Pa} \right]$$

Δp_v può essere ottenuto come la media delle temperature e umidità relative durante tutto il test, oppure come valore tabellare che fornisce la norma, nel nostro caso vale 1207 Pa.

Posso poi trovare il valore di permeabilità al vapore:

$$\delta = W \cdot d \left[\frac{kg}{m \cdot sec \cdot Pa} \right]$$

Il fattore di resistenza al passaggio del vapore si trova invece confrontandolo con la μ dell'aria:

$$\mu = \frac{\Delta p \cdot \delta_{air}}{g \cdot d} \quad [-]$$

4.1.5.2. Risultati e commenti

A seguire si riportano i risultati del test che evidenziano come tutti i campioni hanno riportato dei valori di permeabilità al vapore che li rende idonei ad essere considerati intonaci isolanti.

Il materiale che presenta il coefficiente con valori più elevati è il ThermoCalce014, esso presenta come tipologia di aggregato la perlite espansa che è caratterizzata da ridotte proprietà di permeabilità. Risulta quindi assolutamente prevedibile che per questo campione il valore di permeabilità al passaggio del vapore sia più elevato rispetto quello di intonaci con aggregati

naturali. E' significativa la differenza in termini prestazionali, ottenuta tra il campione ThermoCalce e il ThermoCalce014, entrambi presentano la stessa composizione la differenza sta nel quantitativo di perlite: basta aggiungere il 5% in più di aggregato (25% nel ThermoCalce, 30% nel ThermoCalce014) affinché il coefficiente di permeabilità al vapore risulti molto più alto.

Tra i campioni contenenti aerogel notiamo come vi siano risultati eterogenei. Non conosciamo la loro precisa composizione e il quantitativo di materiale isolante presente, notiamo che ad avere la più alta resistenza al passaggio del vapore è il campione R4, a seguire la Ras024 P, l'Int025 P e la Ras024. I campioni di Ras492 ed in particolare l'Int490 presentano una permeabilità al vapore elevata, quest'ultimo addirittura vicina a quella dell'aria. Queste sostanziali differenze tra i campioni possono derivare da differenti granulometrie per quanto concerne la parte di aggregato, e dall'utilizzo di materiali differenti come leganti.

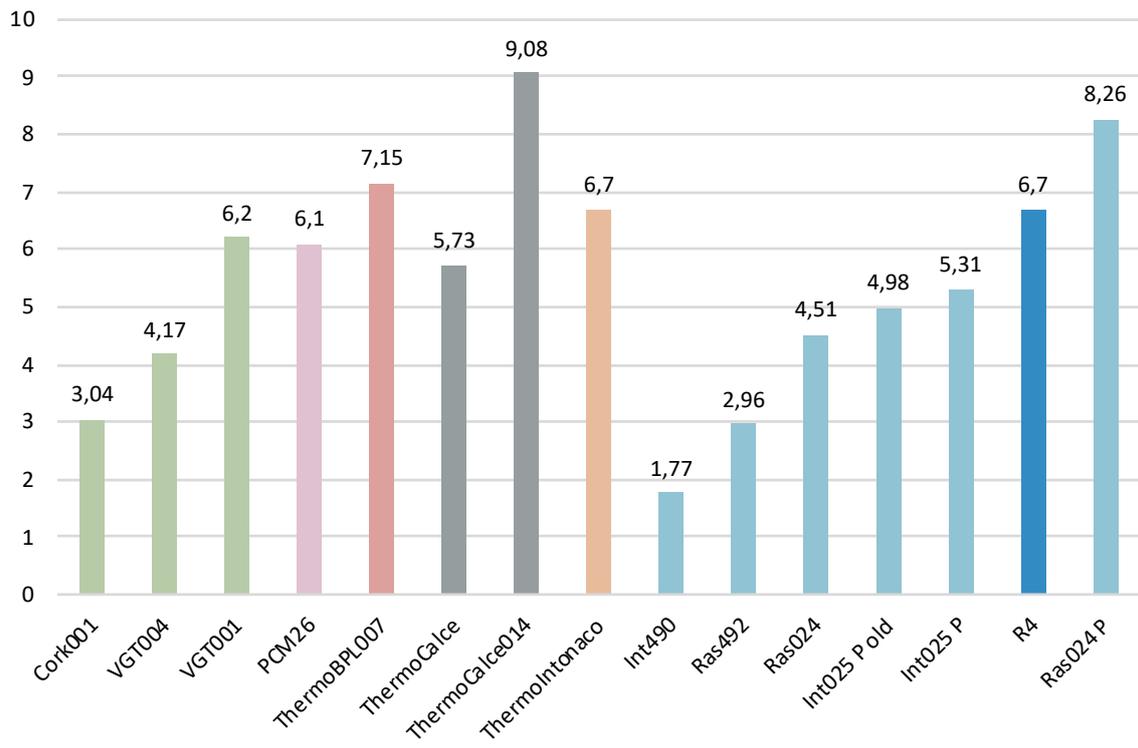
I provini caratterizzati dalla presenza di aggregati vegetali presentano tutti una elevata permeabilità al vapore, in particolare il Cork001, con un valore di 3,04. Ciò si deve alla sua composizione legata ad una tipologia di aggregato costituita da una granulometria più grossa rispetto gli altri campioni, che favorisce la traspirazione e la migrazione del vapore.

Caratterizzati da leganti e aggregati di tipologie differenti i campioni di PCM26, ThermoIntonaco e ThermoBPL007 e presentano caratteristiche di permeabilità al vapore analoghe, con coefficienti rispettivamente di 6,1; 6,7 e 7,15.

L'unico campione per il quale è stato impossibile terminare il test è il BioArtCork. Dopo appena quattro giorni in misura l'acqua contenuta nel recipiente è totalmente evaporata, questo si traduce in una elevata permeabilità, probabilmente dovuta alla grossa dimensione dell'aggregato che rende il materiale poco omogeneo. Il coefficiente assume quindi un valore < 5.

Mi sembra importante sottolineare come tutti i campioni analizzati presentino un coefficiente di resistenza al passaggio del vapore basso, che si traduce in una elevata permeabilità. Sappiamo come il principale nemico dei componenti edilizi sia proprio l'umidità, utilizzare materiali che permettano la migrazione del vapore è senza dubbio consigliabile in quanto riduce sensibilmente il rischio di formazione di condensa interstiziale.

Grafico 12 Coefficiente di permeabilità al vapore μ dei materiali analizzati



4.1.6. Assorbimento d'acqua per capillarità

La presenza e il conseguente spostamento d'acqua allo stato liquido all'interno dei materiali da costruzione è una delle principali cause delle perdite prestazionali dell'involucro edilizio. Risulta fondamentale valutare il tasso di assorbimento d'acqua dei materiali dovuto all'azione capillare della pioggia battente o assimilata durante la costruzione, per controllare al meglio questo fenomeno.

A seconda del livello di umidità la norma EN UNI 15148 del 2002 [126] stabilisce diverse metodologie da seguire per determinare il coefficiente di assorbimento d'acqua, in questo caso si segue il procedimento dell'immersione parziale.

La norma 998-1:2016 definisce i range di valori che può assumere il coefficiente di assorbimento d'acqua per capillarità, esso varia a seconda della tipologia di intonaco a cui si fa riferimento. Nel caso degli intonaci termici questo coefficiente deve rispettare il limite di $W_{c1} = C < 0,40 \text{ Kg/m}^2 \text{ min}^{0,5}$ se applicato in esterno.

4.1.6.1. Test

Il provino deve somigliare il più possibile al materiale posto in opera, deve quindi avere uno spessore rappresentativo, le facce devono essere prive di irregolarità e l'area a contatto con l'acqua deve essere almeno di 50 cm^2 . Al fine di ottenere misurazioni più accurate la normativa consiglia l'utilizzo di provini dalle dimensioni maggiori, di 100 cm^2 , il test è quindi stato portato avanti con campioni dalle dimensioni frontali di $10 \times 10 \text{ cm}$.

Prima di iniziare il test i campioni sono tenuti a 23° C con un umidità relativa del 50% fino a quando non raggiungono massa costante, cioè quando il cambiamento in massa del campione è inferiore dello 0,1% del suo peso, effettuando le misure a distanza di 24 ore.

Una volta raggiunto l'equilibrio, si pesa il provino per determinarne la massa iniziale, esso poi è posizionato all'interno di una bacinella con uno strato d'acqua. E' necessario sigillare le facce laterali del campione, con un sigillante a tenuta d'acqua e di vapore, per evitare che l'acqua risalga o fuoriesca dai lati del provino stesso.

Affinchè risulti parzialmente immerso e quindi con una faccia totalmente a contatto con l'acqua, è essenziale posizionare dei supporti che sostengano il campione, inoltre per ottenere misurazioni realistiche è essenziale che livello dell'acqua sia mantenuto costante per tutta la durata del test. Dopo 5 minuti di immersione il materiale può essere rimosso, viene tamponato con una spugna e ripesato; questa operazione è poi ripetuta dopo aver tenuto il campione a contatto con l'acqua per 20 minuti, poi dopo 1 ora, dopo 2 ore, dopo 4 e dopo 8 ore.

Per valutare l'assorbimento d'acqua è fondamentale conoscere la superficie del provino, si calcola poi la differenza in massa tra il campione bagnato al tempo e il campione asciutto, su l'area totale.

$$\Delta m_t = (m_t - m_i) / A$$

Questi valori vanno calcolati per ogni step di riferimento, dopo di che sono interpolati con la radice quadrata della durata del tempo di immersione.

$$A_w = \frac{\Delta m' - \Delta m'}{\sqrt{t}}$$

4.1.6.2. Risultati e commenti

La tabella riporta i risultati ottenuti espressi in termini di kg di assorbimento orario e al minuto.

Tabella 9 Coefficiente di assorbimento d'acqua per capillarità dei campioni analizzati

Campione	Clog = kg/(m ² ·min ^{0,5})	Wlog = kg/(m ² ·h ^{0,5})
A1	0,376793	2,91862
B2	0,3635582	2,81611
C2	0,290819	2,252675
D1	0,3114812	2,412723
F1	0,305276	2,36466
G2	0,310158	2,40247
BioArtCork	0,317173	2,45681
Cork001	0,488965	3,78751
R1	0,199552	1,54572
R2	0,303531	2,35114
R4	0,066825	0,008627
ThermoArg014	0,459975	3,56295
ThermoBPL001	0,320877	2,485505
ThermoBPL007	0,153072	1,185696
ThermoCalce	0,455975	3,53197
ThermoCalce014	0,442768	3,429668
ThermoIntonaco	0,206619	1,60046
VGT001	0,257408	1,993874
VGT001(grande)	0,52605	4,074768

I campioni di ThermoCalce e ThermoCalce014, contenenti perlite espansa, e di ThermoArg014 contenente argilla espansa, riportano valori finali di questo coefficiente leggermente più elevati rispetto il limite normativo che prevede $C < 0,40 \text{ kg/m}^2\text{min}^{0,5}$. Questi materiali possono comunque trovare applicazione come intonaci per interni, infatti applicati internamente sono meno esposti alla presenza di acqua.

Anche i ThermoBPL001 e 007 sono costituiti da aggregati minerali, a differenza dei precedenti riportano capacità di assorbimento d'acqua più contenute rendendoli adatti all'uso esterno. In particolare il BPL007 riporta come valore di questo coefficiente 0,15 $\text{Kg/m}^2\text{min}^{0,5}$, il più basso tra quelli analizzati

Altri materiali per cui l'unica applicazione progettuale possibile è quella interna all'edificio sono il Cork001 e il VGT001. Come abbiamo visto entrambi i campioni presentano aggregati vegetali le cui caratteristiche igroscopiche li rendono più sensibili all'assorbimento d'acqua rispetto altre tipologie di isolanti. È significativo notare che anche i campioni BioArtCork e VGT001 presentino sughero nelle loro composizioni, ma in quantitativi inferiori, ciò porta ad un valore finale di assorbimento d'acqua per capillarità decisamente più basso rispetto i due precedentemente citati. Nel pieno rispetto dei limiti imposti dalla norma essi possono quindi essere considerati come intonaci adatti all'uso esterno.

Per quanto riguarda i campioni contenenti Aerogel, provino A1, B2, C2, D1, F1, G2, R1, R2, otteniamo dei valori del coefficiente di assorbimento d'acqua per capillarità che rientrano nei parametri stabiliti dalla norma 998, quindi questi materiali possono essere considerati idonei per

un'applicazione esterna. Il campione evidenziato, R4 presenta un valore anomalo, troppo basso rispetto gli altri intonaci, ciò può essere dovuto ad errori in fase di misurazione, quindi è opportuno ripetere il test e non considerare validi questi risultati.

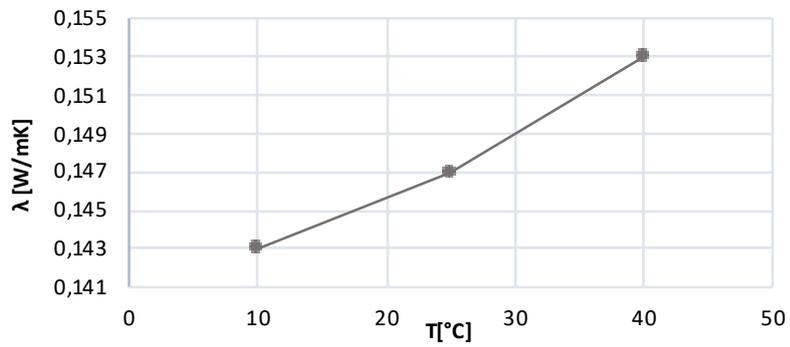
4.1.7. Schede tecniche

Il lavoro di analisi sperimentale condotto in laboratorio porta alla realizzazione di schede tecniche specifiche, contenenti tutti i dati che caratterizzano questi materiali.

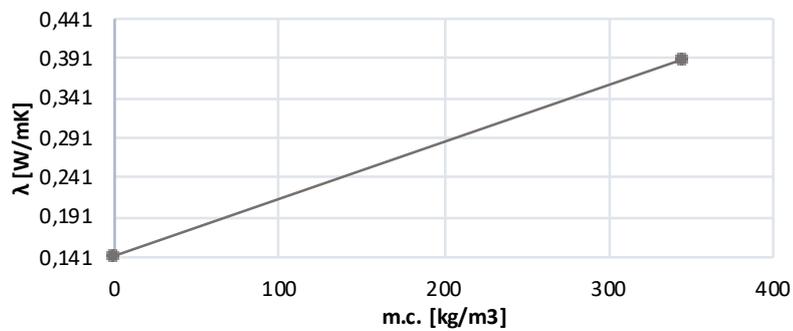
In seguito se ne riporta l'esempio per uno dei materiali analizzati.

THERMOCALCE							
General informations							
Binders	Natural hydraulic lime, Portland cement						
Aggregates	Expanded perlite 25% by mass						
Other compound							
Water ratio	-						
Applications	Internal						
Technical data							
	Value u.m.						
ρ_{dry}	361 kg/m ³						
$\lambda_{10,dry}$	0,143 W/mK						
$\lambda_d (50\% 23^\circ C)$	0,231 W/mK						
c_p	850 J/kgK						
μ	5,73 -						
C_m	0,4559 kg/(m ² min ^{0,5})						
Thermal conductivity as function of temperature							
$T_{media} [^\circ C]$	10	25	40				
$\lambda [W/mK]$	0,143	0,147	0,153				
Thermal conductivity as function of moisture content							
m.c. [kg/m³]	0	189,75	241,5	276	310,5	327,75	345
$\lambda [W/mK]$	0,143						0,39
Moisture adsorption/desorption curves							
R.H. [%]	0%	55%	70%	80%	90%	95%	
u [kg/kg]	0	0,00581	0,00774	0,01274	0,0346	0,04291	
Enthalpy as function of temperature							

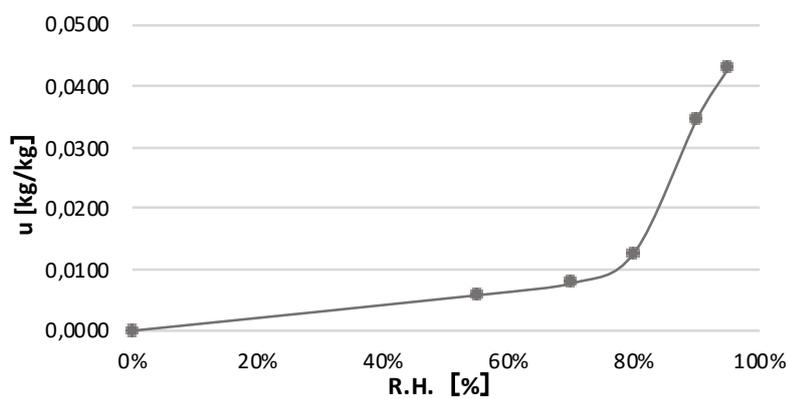
Conducivity as function of temperature



Conducivity as function of moisture content



Moisture adsorption/desorption curves



5. Analisi numerica

Oltre a caratterizzare le proprietà termoigrometriche dei nuovi materiali per l'isolamento, la tesi si pone come obiettivo quello di valutare come si comportano questi intonaci quando applicati su differenti basi murarie e in differenti zone climatiche.

I vari intonaci infatti possono assumere andamenti differenti a seconda delle condizioni in cui sono posti, vogliamo quindi capire se esistono circostanze e/o configurazioni che rendono una soluzione progettuale più adatta rispetto ad un'altra o allo stesso modo, se esistono situazioni in cui le prestazioni dell'isolante non corrispondono alle aspettative.

Tra quelli analizzati in laboratorio sono stati selezionati sette intonaci isolanti, con composizioni e caratteristiche diverse: il Cork001 e il VGT001 sono costituiti da aggregati di origine minerale e vegetale, il ThermoCalce e il ThermoCalce014 presentano aggregati di origine minerale, in particolare Perlite, il PCM26 ha come aggregato materiale a cambiamento di fase, il ThermoIntonaco è costituito da aggregati polimerici e l'Int490 è caratterizzato dalla presenza di aerogel.

Per avere un quadro reale sulle possibili applicazioni e utilità dei risultati sono state selezionate tre tipologie murarie. Il presente lavoro infatti vuole collegarsi a progetti e casi studio reali, analizzati in precedenti lavori di tesi. Si è deciso di prendere in esame le tipologie murarie, composte dalle stesse stratigrafie studiate nelle tesi di Fenoglio [127] che presenta una muratura in mattoni pieni e di Grosso [128], che lavora su una muratura in mattoni con intercapedine d'aria. Queste due risultano essere tra le stratigrafie più comuni e maggiormente presenti nel nostro paese. Altro caso studio è costituito dall'involucro in granite approfondito nel lavoro di Laggiard, Lisitano [129] e che risulta di particolare interesse in quanto l'efficientamento energetico di edifici in pietra è uno dei temi più dibattuti negli ultimi anni.

Altro parametro molto significativo, che determina la fattibilità applicativa e che può influire sul mantenimento delle prestazioni termiche misurate in laboratorio, è la condizione climatica cui è sottoposto l'intonaco isolante. Dei sette campioni ne è quindi stato analizzato il comportamento non solo in funzione delle basi murarie su cui sono applicati ma anche in funzione delle differenti condizioni climatiche presenti nelle tre città selezionate. Luogo d'analisi è Torino, in quanto qui è situato l'immobile oggetto dell'analisi sperimentale in campo descritta nella tesi [128]. Monfero, in Galizia, poiché qui è ubicato il caso studio proposto per la riqualificazione energetica di edifici storici presentato nel lavoro di tesi delle studentesse Laggiard e Lisitano [129]. È stata poi selezionata Catania, mia città natale, dal clima mediterraneo che risulta essere rappresentativo per gran parte della penisola italiana.

La tabella riporta le 63 combinazioni simulate, organizzate in base la località e il tipo di substrato.

Tabella 10 Elenco delle combinazioni di calcolo

Torino			Catania			Monfero		
Granite	Intercapedine	Mattoni	Granite	Intercapedine	Mattoni	Granite	Intercapedine	Mattoni
Cork001	Cork001	Cork001	Cork001	Cork001	Cork001	Cork001	Cork001	Cork001
Int490	Int490	Int490	Int490	Int490	Int490	Int490	Int490	Int490
PCM26	PCM27	PCM27	PCM26	PCM27	PCM27	PCM26	PCM27	PCM27
ThCalce	ThCalce	ThCalce	ThCalce	ThCalce	ThCalce	ThCalce	ThCalce	ThCalce
ThCalce014	ThCalce014	ThCalce014	ThCalce014	ThCalce014	ThCalce014	ThCalce014	ThCalce014	ThCalce014
ThIntonaco	ThIntonaco	ThIntonaco	ThIntonaco	ThIntonaco	ThIntonaco	ThIntonaco	ThIntonaco	ThIntonaco
VGT001	VGT001	VGT001	VGT001	VGT001	VGT001	VGT001	VGT001	VGT001

5.1. Caso studio 1: Involucro in mattoni pieni

Il primo caso studio riguarda la cascina che fu oggetto di riqualificazione energetica nel 2013, caso ampiamente studiato nella tesi di Fenoglio [127].

L'edificio, sito in provincia di Cuneo, fu costruito tra la fine del XIX secolo e l'inizio del XX, l'involucro opaco esterno è composto da laterizi e prima della ristrutturazione a scopo residenziale, era adibito ad un uso prevalentemente agricolo.

Figura 11 Fotografia caso studio 1 (Fonte v. nota 127)



Figura 12 Stratigrafia involucro in mattoni pieni (Rielaborazione grafica)

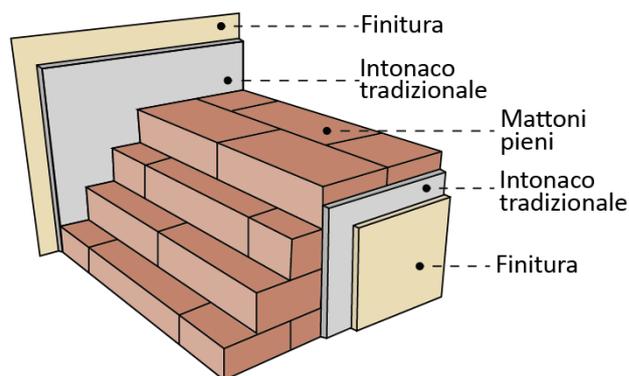


Tabella 11 Dati geometrici e termofisici della stratigrafia in mattoni pieni

Involucro in mattoni pieni							
	materiale	s	ρ	porosità	cp	λ	μ
		cm	kg/m ³	m ³ /m ³	J/kgK	W/mK	-
esterno							
1	finitura	0,3	1482	0,44	850	0,954	17
2	intonaco tradizionale	1,5	1475	0,43	850	0,641	17
3	mattoni pieni	50	1952	0,26	863	0,955	19
4	intonaco tradizionale	1,5	1475	0,43	850	0,641	17
5	finitura	0,3	1482	0,44	850	0,954	17
interno							

5.2. Caso studio 2: involucro in mattoni con intercapedine d'aria

L'edificio scelto come oggetto di indagine è stato precedentemente studiato nella tesi di Giulia Grosso [128], situato nella città di Torino, si stima sia stato edificato negli anni '20 e presenta il tipico involucro composto da mattoni pieni con intercapedine d'aria. I valori di trasmittanza termica misurata in campo si risultano di 1,19 W/m²K.

Figura 8 Fotografia caso studio 2 (Fonte v. nota 128)



Figura 9 Stratigrafia involucro in mattoni con intercapedine d'aria (Rielaborazione grafica)

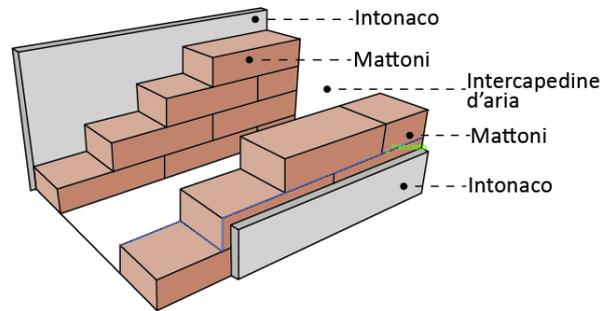


Tabella 12 Dati geometrici e termofisici della stratigrafia del muro con intercapedine d'aria

Involucro in mattoni con intercapedine d'aria							
	materiale	s	ρ	porosità	cp	λ	μ
		cm	kg/m ³	m ³ /m ³	J/kgK	W/mK	-
esterno							
1	intonaco	1	1800	0,302	800	0,82	12
2	mattoni	12,5	1704,6	0,357	890	1,188	18,74
3	intercapedine d'aria	25	1,3	1	1050	1,38	0,2
4	mattoni	12,5	1704,6	0,357	890	1,188	18,74
5	intonaco	1	1800	0,302	800	0,82	12
interno							

5.3. Caso studio 3: involucro in pietra

Il Monastero di Santa Maria di Monfero in Galizia ha origini molto antiche: è citato già in diversi scritti risalenti al X secolo. L'involucro esterno è interamente costituito da Granite, roccia ignea intrusiva felsica, una delle più abbondanti presenti sulla Terra, da sempre utilizzata per la sua versatilità.

Figura 10 Fotografia caso studio 3 (Fonte v. nota 129)



Figura 11 Stratigrafia involucro in granite (Rielaborazione grafica)

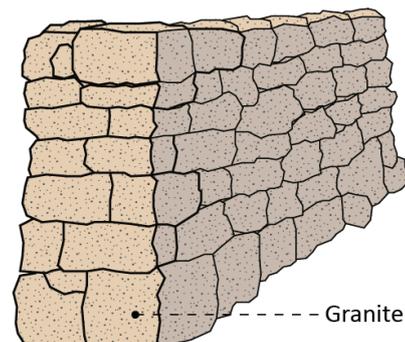


Tabella 13 Dati geometrici e termofisici della stratigrafia del muro in pietra

Involucro in pietra							
	materiale	s	ρ	porosità	cp	λ	μ
		cm	kg/m ³	m ³ /m ³	J/kgK	W/mK	-
esterno							
1	Granite	31	2900	0,95	702	1,66	54
interno							

5.4. Calcolo in regime stazionario

Si è visto come per rispondere ai requisiti di risparmio e di efficienza energetica divenuti obbligatori [3], è necessario in fase progettuale valutare puntualmente quali interventi portino a risultati più performanti. Le prescrizioni normative permettono di fare queste valutazioni sulla base di parametri sintetici che descrivono il fenomeno in condizioni stazionarie, in cui il flusso di calore e le temperature sono considerate costanti nel tempo. Ciò permette di trattare in maniera unificata tutti i meccanismi connessi alla trasmissione del calore, ottenendo dei parametri che descrivano quantitativamente i flussi termici scambiati dall'involucro edilizio con l'esterno.

Il fenomeno fisico relativo alla trasmissione del calore avviene per conduzione, convezione, irraggiamento.

$$Q_{\text{tot}} = Q_{\text{conduzione}} + Q_{\text{convezione}} + Q_{\text{irraggiamento}} \text{ [W]}$$

Il regime stazionario tiene conto solo della trasmissione per conduzione, valutato attraverso il parametro della trasmittanza $U \left[\frac{W}{m^2K} \right]$, che rappresenta il flusso di calore che attraversa una superficie di area unitaria sottoposta a differenza di temperatura pari ad 1°C [130].

La valutazione quantitativa del flusso di calore $Q_{\text{conduzione}}$ che attraversa la sezione muraria, quindi in condizioni stazionarie, avviene moltiplicando il valore della trasmittanza U del muro per la sua estensione A [m²] e per la differenza di temperatura tra ambiente esterno ed interno ΔT [°C].

$$Q_{\text{tot}} = Q_{\text{conduzione}} = U \cdot A \cdot \Delta T \text{ [W]}$$

La prima fase di questa analisi numerica si è occupata di applicare il calcolo stazionario alle tipologie murarie selezionate, in modo da avere un riferimento per le valutazioni successive, condotte con metodi più precisi (v. par. 5.5).

5.4.1. UNI EN ISO 6949

A livello europeo ed italiano vi sono diverse normative che spiegano come quantificare e valutare i fenomeni di trasmissione del calore e di umidità all'interno degli edifici. Molte di queste descrivono i fenomeni legati al comportamento delle pareti secondo metodi semplificati, in particolare per valutare i fenomeni legati alla trasmissione del calore, si fa riferimento alla norma

UNI EN ISO 6946:2008 [130] per il calcolo della resistenza termica e della trasmittanza termica dell'involucro edilizio.

La trasmittanza termica U di una partizione viene definita come reciproco della resistenza termica totale R_T :

$$U = \frac{1}{R_{si} + R_{se} + R_1 + R_2 + R_n + \dots} \quad \left[\frac{W}{m^2 K} \right]$$

R_{si} ed R_{se} sono le resistenze termiche superficiali interna ed esterna in $m^2 K/W$

La normativa attribuisce a questi due parametri dei valori fissi a seconda della direzione del flusso termico. Generalmente il flusso è considerato orizzontale e si considera: per la resistenza termica interna $1/8$ ($=0,125 m^2 K/W$) per quella esterna $1/23$ ($=0,043 m^2 K/W$).

Le resistenze termiche dei singoli strati sono definite come:

$$R = \frac{s}{\lambda} \quad \left[\frac{m^2 K}{W} \right]$$

s è lo spessore dello strato in metri,

λ è il coefficiente di conduttività termica a secco del materiale in W/mK

In Tabella 11, Tabella 12 e Tabella 13 sono riportati i dati relativi a conduttività termica e spessore dei layers che compongono le murature in esame, dati necessari per il calcolo della trasmittanza secondo la UNI EN ISO 6946:2008 [130].

La normativa [130] definisce inoltre dei valori di default per le resistenze termiche delle intercapedini d'aria non ventilate con spessori inferiori ai 30 cm. Per il calcolo della trasmittanza termica della stratigrafia in muratura con intercapedine è stato quindi imputato il valore di resistenza di quest'ultima pari a 0,18.

La Tabella 14 riassume i valori di trasmittanza termica in regime stazionario ottenuti per le diverse stratigrafie. E' importante specificare che per quello che riguarda il coefficiente di resistenza termica superficiale esterno è stato utilizzato il valore di $1/17$ ($= 0,058 m^2 K/W$) poiché è quello che è stato successivamente inserito nel software Wufi.

Tabella 14 *Trasmittanza termica in regime stazionario delle configurazioni analizzate*

	Cork001	Int490	PCM26	ThCalce	ThCalce014	ThIntonaco	VGT001	
Granite	1,027	0,385	1,082	1,260	0,919	0,926	1,014	W/m²K
Intercapedine	0,833	0,354	0,869	0,980	0,760	0,765	0,824	W/m²K
Mattoni	0,749	0,338	0,778	0,866	0,690	0,694	0,743	W/m²K

5.5. Wufi Pro

Per effettuare delle valutazioni attendibili e il più possibile precise si è scelto di utilizzare il software Wufi Pro, della casa tedesca Fraunhofer IBP (Institute of Building Physics). Il programma si basa sul metodo di calcolo descritto nella normativa e permette di valutare:

- la distribuzione temporale e spaziale delle condizioni igrotermiche (temperatura, umidità relativa, contenuto d'acqua)
- il contenuto di acqua e di umidità nei singoli strati e in punti specifici
- la crescita di muffe all'interno dei singoli componenti

Dobbiamo però tenere presente che il software consente di esaminare solo strutture bidimensionali, non considera la possibile presenza di sali e di discontinuità nei materiali, non tiene conto di fenomeni quali la gravità o di specifiche situazioni al contorno.

Per effettuare l'analisi termoigrometrica è necessario inserire all'interno del software le seguenti informazioni:

- stratigrafia della parete, con i relativi spessori e caratteristiche dei singoli materiali che la compongono
- orientamento e inclinazione della parete con conseguente livello di esposizione alla pioggia
- coefficienti di trasmissione superficiali
- temperatura e umidità dell'elemento all'inizio del periodo di calcolo
- data di inizio e di fine del periodo di calcolo con relativo time step
- clima interno e clima esterno

5.5.1. Calcolo in regime dinamico

Per avere una valutazione più completa del fenomeno fisico facciamo riferimento alla norma EN 15026:2007 [131] che presenta la metodologia di calcolo in regime dinamico in cui i flussi non sono più considerati costanti, ma variabili nel tempo poiché vengono considerati anche i fenomeni di accumulo e dissipazione. Questa metodologia inoltre tiene conto del tasso occupazionale degli ambienti e quindi delle variazioni climatiche negli ambienti interni e analizza come le variazioni climatiche esterne (pioggia, irraggiamento ecc..) influenzino il comportamento delle murature.

La tabella seguente riassume brevemente quali sono i meccanismi e le cause alla base del trasporto del calore, del vapore e dell'acqua all'interno dei componenti edilizi.

Tabella 15 Trasmissione di materia energia in regime dinamico (Rielaborazione grafica)

Trasporto	Meccanismo	Causa/potenziale di trasporto
Calore	Conduzione termica	Temperatura
	Radiazione termica	Temperatura alla 4° potenza
	Flusso d'aria	Pressione totale, gradiente di densità
	tramite trasporto di umidità	Diffusione di vapore e trasporto liquido
Massa in fase gassosa = vapore	Diffusione di vapore	Pressione di vapore
	Trasporto molecolare	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

5.5.2. Stratigrafie e materiali

I materiali e le loro diverse caratteristiche sono descritti da alcuni parametri che è necessario inserire all'interno del database del software prima di iniziare l'analisi:

- Densità [kg/m³]
- Porosità [m³/m³]
- Calore specifico [J/kgK]
- Conduttività termica [W/mK]
- Resistenza alla diffusione del vapore [-]

E' da tenere presente che alcune di queste proprietà variano leggermente se sottoposte a variazioni di temperatura o umidità, sono funzioni dipendenti dalle condizioni in cui sono poste. Quindi per descrivere più accuratamente il fenomeno è necessario inserire anche i grafici di:

- Conduttività termica in funzione della temperatura
- Conduttività termica in funzione del contenuto di acqua
- Assorbimento di acqua per capillarità
- Curve di assorbimento dell'umidità

Per quello che riguarda gli intonaci isolanti sono stati creati dei nuovi file per ogni materiale ed inseriti i valori caratterizzanti precedentemente misurati in laboratorio.

Per gli involucri esistenti invece, non essendo possibile indagare le specifiche proprietà dei singoli materiali, sono stati selezionati dei materiali già presenti nel database di Wufi, in particolare nel database MASEA, e per alcuni di essi sono state modificate le proprietà di densità, conduttività termica, resistenza al passaggio del vapore.

5.5.3. Orientamento, inclinazione, esposizione alla pioggia, vento

E' stato concordato di analizzare il comportamento di questi materiali quando sottoposti alle condizioni più sfavorevoli, la simulazione riguarda pareti esposte a nord, che quindi non risentono degli apporti solari.

Per quello che riguarda i parametri relativi la pioggia facciamo riferimento alla normativa ASHRAE 160: il fattore di esposizione dell'elemento considerato medio e quindi imposto uguale a 1, il fattore di adesione della pioggia è considerata come quella di una parete sotto un tetto poco inclinato e quindi impostata a 0,5.

I dati relativi temperatura e velocità del vento sono stati considerati in accordo con i dati climatici presenti nel database del software.

5.5.4. Periodo di calcolo, time step

Il periodo di calcolo è stato definito in base a quando il materiale posto in opera raggiunge l'equilibrio; l'assestamento avviene intorno la fine del primo anno di calcolo. Si è deciso comunque di analizzarne approfonditamente il comportamento a partire dai dati del terzo anno, per tutta la sua durata fino al quarto anno.

Il time step risulta uguale ad un'ora.

5.5.5. Dati climatici

Il software contiene anche un database con i dati climatici delle principali città italiane, sono dati reperiti con precisione oraria e riguardano:

- Temperatura esterna [°C]
- Umidità esterna [%]
- Radiazione solare globale sul piano orizzontale [W/m²]
- Velocità [m/s] e direzione del vento [°]
- Pioggia [mm]

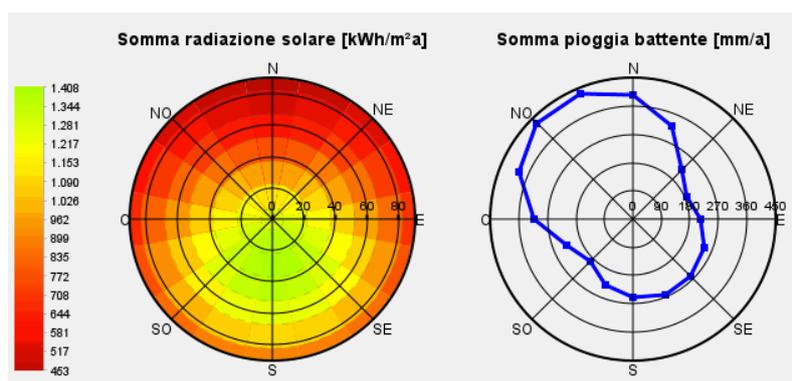
Per ogni località queste informazioni vengono elaborate e schematizzate in una serie di grafici e schemi che rappresentano i valori massimi, minimi e medi di temperatura e umidità relativa, e i valori di pioggia battente in base l'orientamento del componente.

5.5.5.1. Torino

Facendo riferimento ai lavori precedenti si è scelta Torino, situata in zona climatica E, ha un numero di Gradi Giorno compreso tra 2100 e 3000.

I gradi giorno rappresentano un indice per descrivere i dati climatici di un luogo, tanto più sono elevati, più la temperatura in quella regione è rigida, indicano il fabbisogno termico necessario mediamente per mantenere il clima confortevole all'interno di un'abitazione [132].

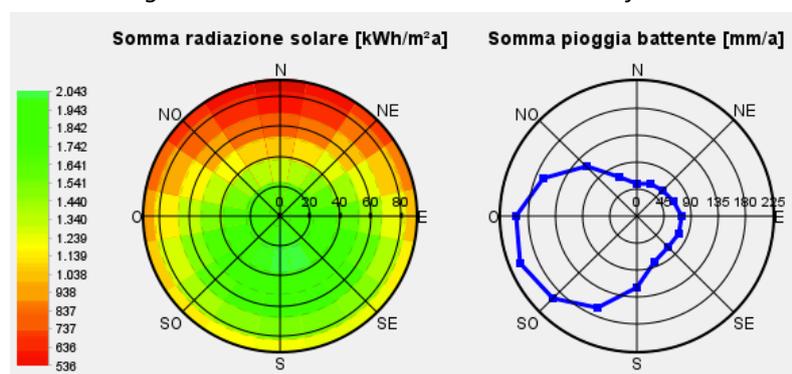
Figura 13 Dati climatici di Torino su Wufi Pro



5.5.5.2. Catania

E' stata poi selezionata Catania, posta nella zona climatica B, presenta 830 Gradi Giorno e ha una temperature media annua di 17,3 °C. I mesi invernali risultano meno rigidi e di conseguenza il periodo di riscaldamento è di breve durata, vi sono però altri tipi di criticità in quanto è caratterizzata da escursioni termiche molto elevate tra il giorno e la notte ed essendo sul mare si nota la presenza di vento anche ad elevate velocità.

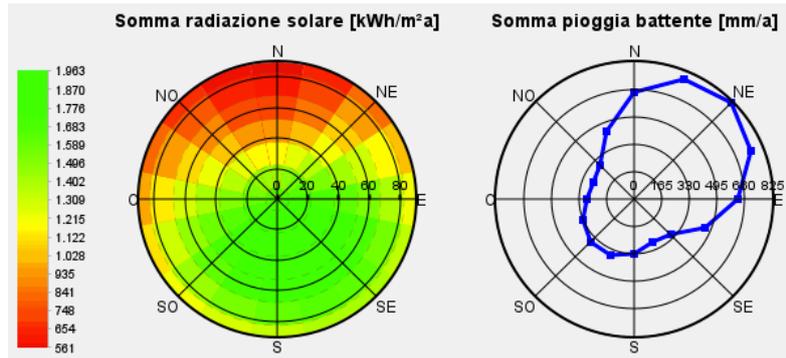
Figura 14 Dati climatici di Catania su Wufi Pro



5.5.5.3. Monfero

Altro luogo d'analisi, è Monfero. Situato a nord-ovest della Spagna, i suoi dati climatici sono stati reperiti dalle tesi di Laggiard e Lisitano [129] e fanno riferimento all'anno 2005: le temperature medie annuali non risultano mai eccessivamente rigide o eccessivamente calde, gli sbalzi termici giornalieri risultano accentuati sono nei mesi estivi e primaverili. Rispetto le due città italiane una sostanziale differenza è il livello di umidità: Monfero presenta un'umidità relativa decisamente più elevata, con valori medi dell'80% e picchi fino al 92%.

Figura 15 Dati climatici di Monfero su Wufi Pro



5.5.6. Condizioni interne

Per quello che riguarda le condizioni climatiche interne il software Wufi permette di scegliere tra diverse metodologie di calcolo che fanno riferimento alle normative europee ed internazionali di efficienza energetica.

E' stata utilizzata la normativa UNI EN 15026 [111]. E' possibile fare delle distinzioni sulla tipologia di clima interno in base ai sistemi di controllo dell'umidità installati negli ambienti: il carico di umidità può essere basso, normale o alto. Per tutte le simulazioni è stato impostato un carico di umidità alto, in modo questo modo è possibile studiare il comportamento dei materiali quando sottoposti a condizioni molto sfavorevoli.

5.6. Risultati e analisi delle simulazioni

Al fine di avere parametri confrontabili con i casi in regime stazionario, sono stati analizzati i seguenti dati orari, discussi nei paragrafi seguenti:

- Contenuto d'acqua all'interno della parete
- Contenuto d'acqua all'interno dell'intonaco isolante
- Conduttività termica dell'intonaco isolante
- Trasmittanza termica della parete
- Formazione di condensa o muffe

5.6.1. Il contenuto d'acqua

Come abbiamo visto, il contenuto d'acqua e l'umidità sono i parametri che è necessario controllare quando si parla di componenti edilizi, poiché è proprio la presenza di acqua a modificare maggiormente le caratteristiche dei materiali. Quello che inizialmente può sembrare un prodotto molto performante dal punto di vista termico, posto in opera può rivelarsi inadatto poiché le sue caratteristiche sono "peggiorate" a causa delle condizioni termo-igrometriche a cui è sottoposto. Oltre a causare perdite prestazionali, è sufficiente un leggero incremento di uno di questi due parametri perché si incorra in problemi quali condensazione, crescita di muffe, ecc..

E' stato quindi attenzionato il quantitativo di acqua presente nello strato di intonaco termico in kg/m^3 per il periodo di un anno. In tutte le simulazioni i mesi invernali e quelli a ridosso risultano essere i più critici in quanto l'acqua presente nella parete incontra più difficoltà ad evaporare, i grafici seguenti riportano i valori massimi e minimi di contenuto d'acqua presente negli isolanti, analizzato in base la tipologia di supporto murario.

Il Cork001 presenta in tutte le configurazioni i maggiori quantitativi d'acqua: da un minimo di 25 ad un massimo di 29 kg/m^3 , ottenuto su basi murarie in Granite. La componente vegetale di questo materiale risente in modo particolare della presenza di umidità e di acqua, è quindi l'igroscopicità di questa tipologia di aggregato causa dell'accumulo all'interno di tutto l'intonaco. Approfondendo lo studio dei valori ottenuti nei singoli mesi si nota come non vi siano incrementi o diminuzioni consistenti ma che il contenuto di acqua varia, durante tutto il periodo invernale, e in tutte le configurazioni, entro un range limitato. E' importante notare anche come il contenuto d'acqua sia praticamente costante in tutte e tre le località analizzate, ciò significa che questo materiale poco risente delle condizioni climatiche cui è sottoposto.

Altro campione contenente aggregato vegetale, ma in quantità ridotte, è il VGT001. A differenza del precedente il contenuto d'acqua assume un andamento crescente fino a febbraio, in cui si registrano i valori massimi per tutte le configurazioni. Questo fenomeno, particolarmente evidente nella stratigrafia in granite, è dovuto al fatto che il materiale risente delle condizioni climatiche accumulando acqua durante i mesi più freddi, acqua che evapora nel periodo estivo, restituendo ad ottobre i valori minimi.

Il quantitativo d'acqua presente all'interno del campione di PCM26 assume valori costanti, tra gli 11 e i 14 kg/m³ quando applicato su basi murarie in mattoni pieni o in mattoni con intercapedine. Applicato sulla base muraria in granite invece risente maggiormente sia delle condizioni climatiche, con notevoli differenze tra le tre città, sia del fenomeno di accumulo dovuto al periodo invernale, per cui febbraio risulta maggiormente saturo d'acqua.

Anche per l'Int490, contenente Aerogel, il quantitativo d'acqua ha valori massimi e minimi pressochè costanti nelle diverse configurazioni analizzate. E' però l'unico materiale in cui vi sono differenze visibili tra i valori massimi e minimi, in tutti gli altri campioni infatti questi due parametri si distaccano di un quantitativo molto limitato.

I campioni di ThermoCalce, ThermoCalce014 e ThermoIntonaco presentano lo stesso comportamento in tutte le casistiche. Tra quelli analizzati sono i materiali meno soggetti all'accumulo d'acqua, infatti i valori massimi non raggiungono gli 8 kg/m³, quantitativo davvero esiguo se confrontato ad esempio con il Cork001. Anche in questo caso possiamo notare come i quantitativi maggiori appartengono ai mesi di febbraio e marzo, fenomeno sempre dovuto al fatto che le basse temperature e l'elevata piovosità dei mesi più freddi porta all'accumulo d'acqua.

I contenuti maggiori sono stati raggiunti nelle stratigrafie Granite, in cui tutti gli isolanti presentano un paio di kg/m³ in più rispetto le soluzioni mattoni e intercapedine. Il muro in pietra infatti non presenta nessun tipo di rivestimento esterno e ciò lo rende più soggetto all'accumulo d'acqua, inoltre è quello ad avere spessore più ridotto.

Altro parametro da valutare è in che modo le condizioni climatiche influenzino il comportamento degli isolanti. Per quasi la totalità delle casistiche i quantitativi maggiori si sono raggiunti a Torino, città dal clima continentale, presenta valori di umidità elevata, limitando il fenomeno dell'evaporazione. I valori minimi sono stati rilevati nella località di Catania. Nonostante alcune simulazioni mettano in evidenza una certa differenza di contenuti d'acqua tra queste due località esse non assumono quantitativi così consistenti da poter essere considerati parametri validi per la scelta di un a tipologia di isolante piuttosto che un'altra. Questo può essere dovuto al fatto che l'isolante è applicato internamente e quindi risente in modo marginale del clima esterno in quanto la massa muraria sulla quale è applicato funge da barriera.

Grafico 13 Risultati nella stratigrafia Granite: contenuto d'acqua massimo e minimo nei mesi invernali

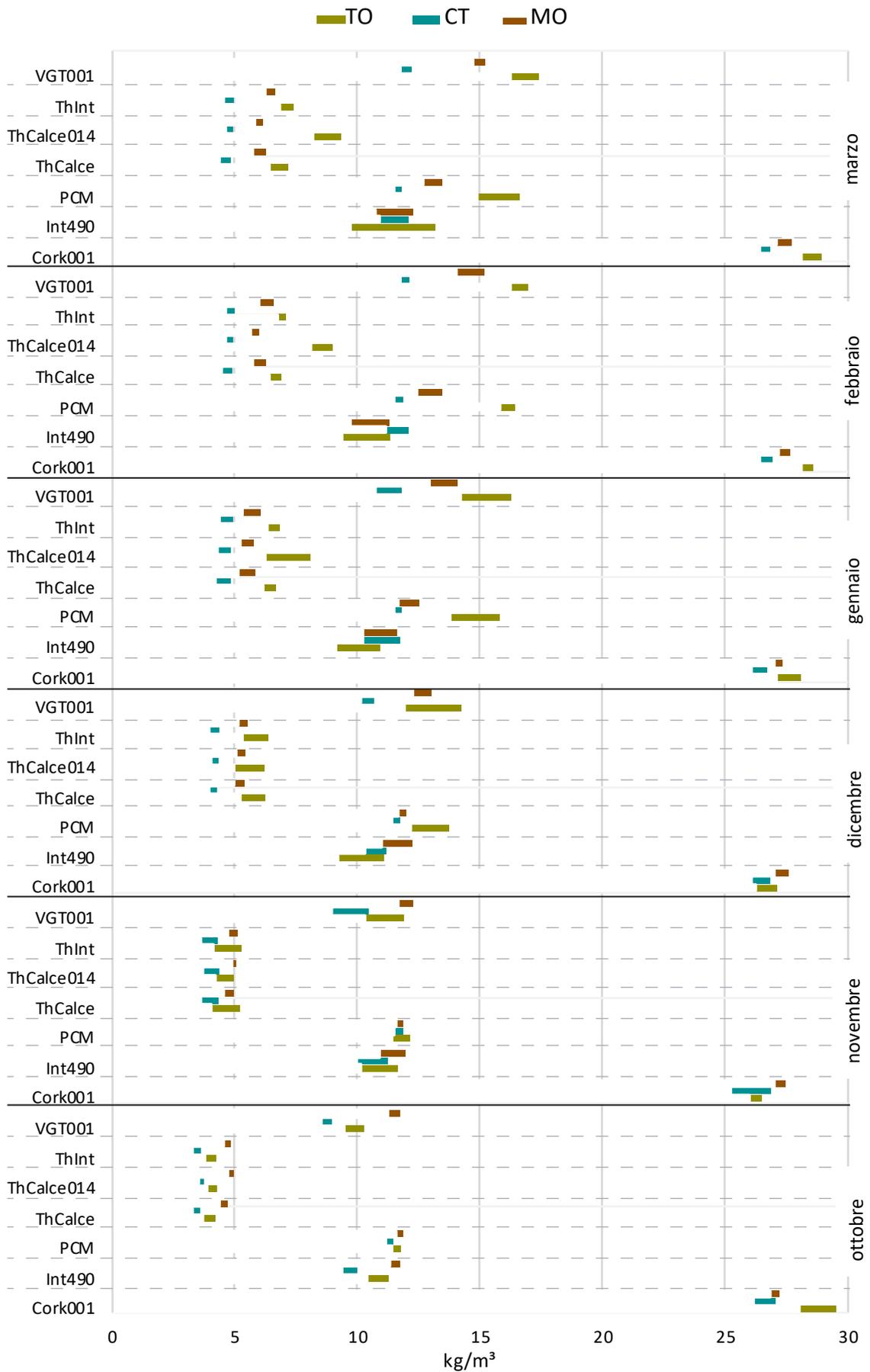


Grafico 14 Risultati nella stratigrafia Intercapedine: contenuto d'acqua massimo e minimo nei mesi invernali

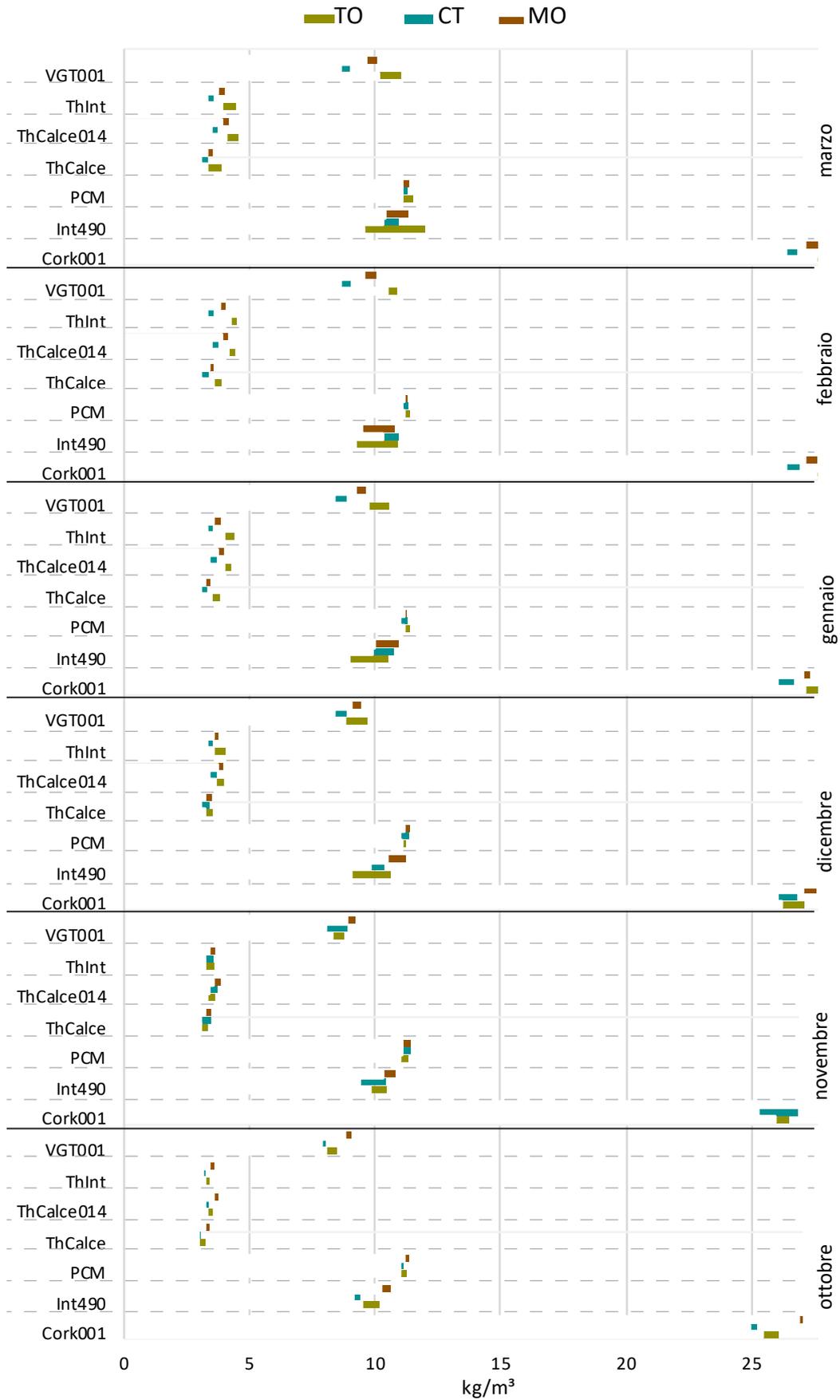
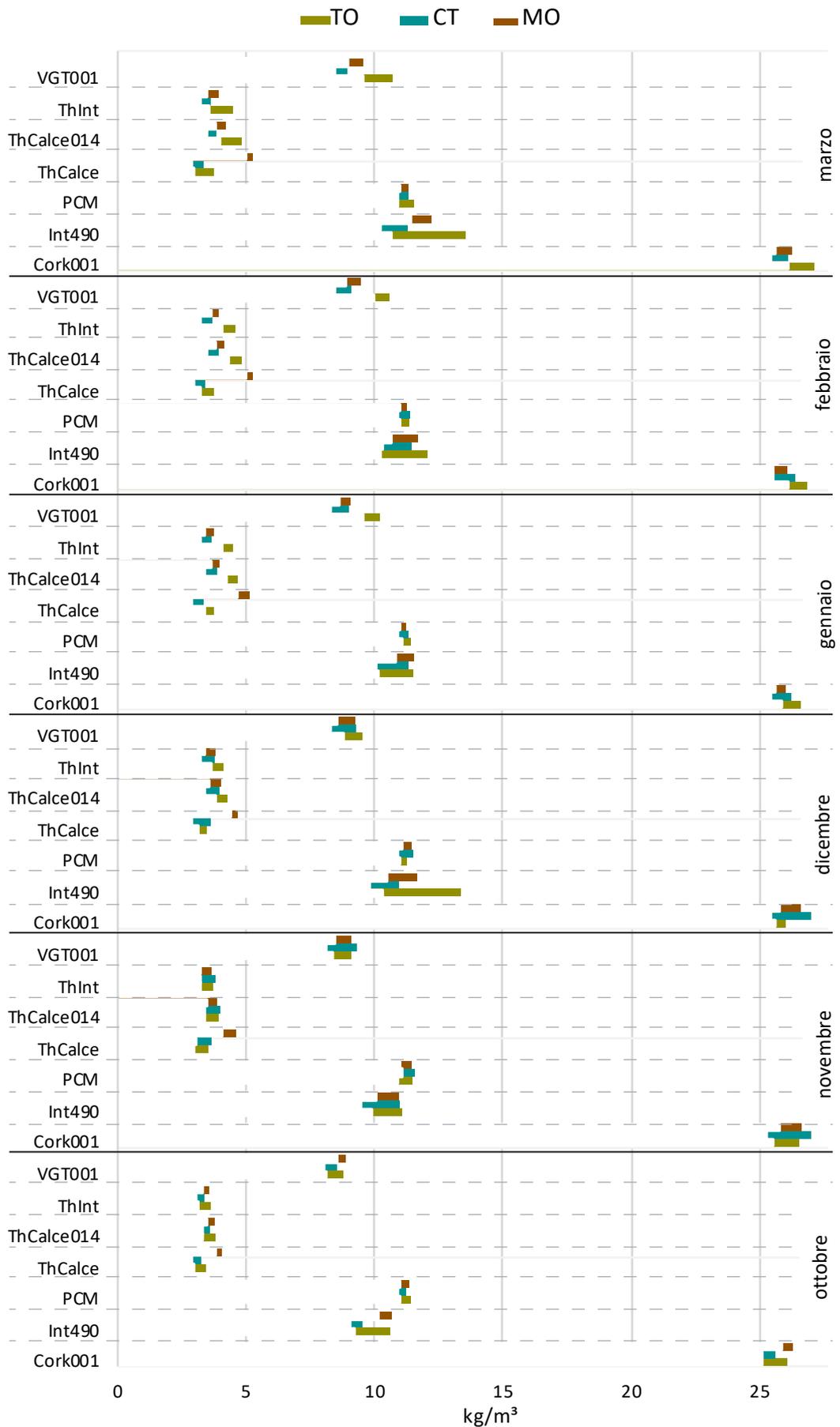


Grafico 15 Risultati nella stratigrafia mattoni: contenuto d'acqua massimo e minimo nei mesi invernali



5.6.2. La variazione di conduttività dei termointonaci

Quando si parla di conduttività termica di un materiale si fa riferimento alle sue caratteristiche da asciutto. Sappiamo che queste caratteristiche variano in funzione di temperatura e umidità; è quindi fondamentale capire come lavora il materiale posto in opera e se le sue proprietà restano invariate o subiscono degli incrementi che ne modificano il comportamento.

Tramite la lettura dei dati riguardanti il contenuto d'acqua all'interno dell'isolante è possibile calcolare di quanto aumenta la conduttività rispetto al valore a secco, questo incremento è differente per ogni tipo di materiale.

Per meglio interpretare il fenomeno e darne una lettura più approfondita sono stati scelti due criteri di analisi; uno per valutare l'influenza che ha la tipologia muraria sulla quale è applicato il materiale (v. par. 5.6.2.1), l'altra per capire come le condizioni climatiche modifichino il comportamento termico dell'isolante (v. par. 5.6.2.2.). I dati analizzati fanno riferimento al periodo invernale e ai mesi a ridosso (ottobre-marzo) e sono riassunti e descritti come valori medi riferiti all'intero periodo.

Dei sette campioni simulati quello più soggetto all'accumulo d'acqua è il Cork001 (v. par. 10.1; 10.2; 10.3), che di conseguenza subisce una variazione prestazionale notevole in quanto il valore di conduttività termica in tutte le simulazioni risulta raddoppiato rispetto quello a secco misurato in laboratorio (0,1 W/mK). Questa composizione quando applicata, subisce un incremento di conduttività pari a più del 100% e questo probabilmente è dovuto alla sua composizione.

Altro intonaco composto da aggregati minerali e vegetali è il VGT001. A differenza del Cork001 in questo campione non vi è una variazione di conduttività così consistente, da 0,098 W/mK a secco, la conduttività termica media nelle diverse casistiche risulta di 0,11 W/mK. L'incremento risulta quindi pari a circa il 16% (v. par. 10.19; 10.20; 10.21).

A seguire la formulazione che subisce il maggior calo prestazionale è il PCM26, con un incremento medio di circa il 48% (v. par. 10.7; 10.8; 10.9). I valori ottenuti tramite le simulazioni riportano valori medi di conduttività termica di 0,155 W/mK contro 0,109 W/mK della misura a secco.

Il campione di ThermolIntonaco, avente come aggregato l'EPS, parte da una conducibilità termica a secco di 0,085 W/mK, applicato nelle diverse configurazioni subisce un incremento medio del 32%, restituendo quindi valori di conducibilità di 0,11 W/mK (v. par. 10.16; 10.17; 10.18).

Materiale avente come aggregato l'Aerogel è l'Int490, che tra gli intonaci studiati, risulta essere quello con conduttività termica a secco (0,027 W/mK) più bassa. In questo caso le simulazioni evidenziano una perdita prestazionale che varia dal 15 (applicato sul Granite) al 19% (applicato

sul muro in mattoni pieni), ciò nonostante resta il campione con la conduttività termica inferiore (v. par. 10.4; 10.5; 10.6).

I campioni ThermoCalce e ThermoCalce014 presentano come aggregato la perlite espansa, miscelata in quantitativi differenti, i due materiali riportano comportamenti analoghi con incrementi che variano dal 6 all'10% in tutte le simulazioni (v. par. 10.10; 10.11; 10.12; 10.13; 10.14; 10.15). Queste sono le formulazioni che presentano le minori differenze tra i valori di conduttività termica misurati in laboratorio e quelli ottenuti tramite le simulazioni dinamiche.

5.6.2.1. L'influenza della base muraria

Il Grafico 16, il Grafico 17 e il Grafico 18 riportano, per le relative tipologie murarie, i valori di conduttività termica minimi e massimi ottenuti nelle singole località e il valore a secco. Inoltre, poichè non sono state riscontrate differenze significative al variare del clima, sono state rappresentate le differenze percentuali medie tra il valore calcolato e quello a secco, per ogni configurazione muraria (valori riportati dalle parentesi graffe).

Per tutti i campioni la configurazione che riporta gli incrementi maggiori risulta quella con il muro di granite. Esso infatti oltre ad essere quello con spessore più ridotto, è costituito esclusivamente dallo strato di pietra che non presenta nessun tipo di rivestimento esterno e risulta quindi più esposto all'azione delle piogge. E' da tenere presente poi che le altre configurazioni presentano stratigrafie composte da più layers, ciò risulta essere vantaggioso in quanto la presenza di più strati con permeabilità al vapore diverse e prestazioni igrometriche differenti possono garantire una maggiore protezione degli strati interni.

In particolare, si notano in tutte le località, nelle stratigrafie granite, incrementi maggiori per i campioni Cork001 e PCM26. Come esplicitato prima, ciò può essere dovuto alla composizione stessa dell'intonaco.

Possiamo comunque affermare che, per i casi studiati, il tipo di supporto murario su cui viene applicato l'intonaco isolante non influisce sul comportamento dello stesso, gli incrementi di conduttività termica nelle diverse casistiche hanno variazioni così minime da non influire nel bilancio finale. Tutti i materiali studiati mantengono le caratteristiche di intonaci isolanti richieste dalla normativa. A parte il Cork001 e il PCM26, i campioni analizzati non subiscono incrementi significativi da comprometterne il loro uso.

Grafico 16 Risultati nella stratigrafia Granite: variazione di conduttività negli isolanti

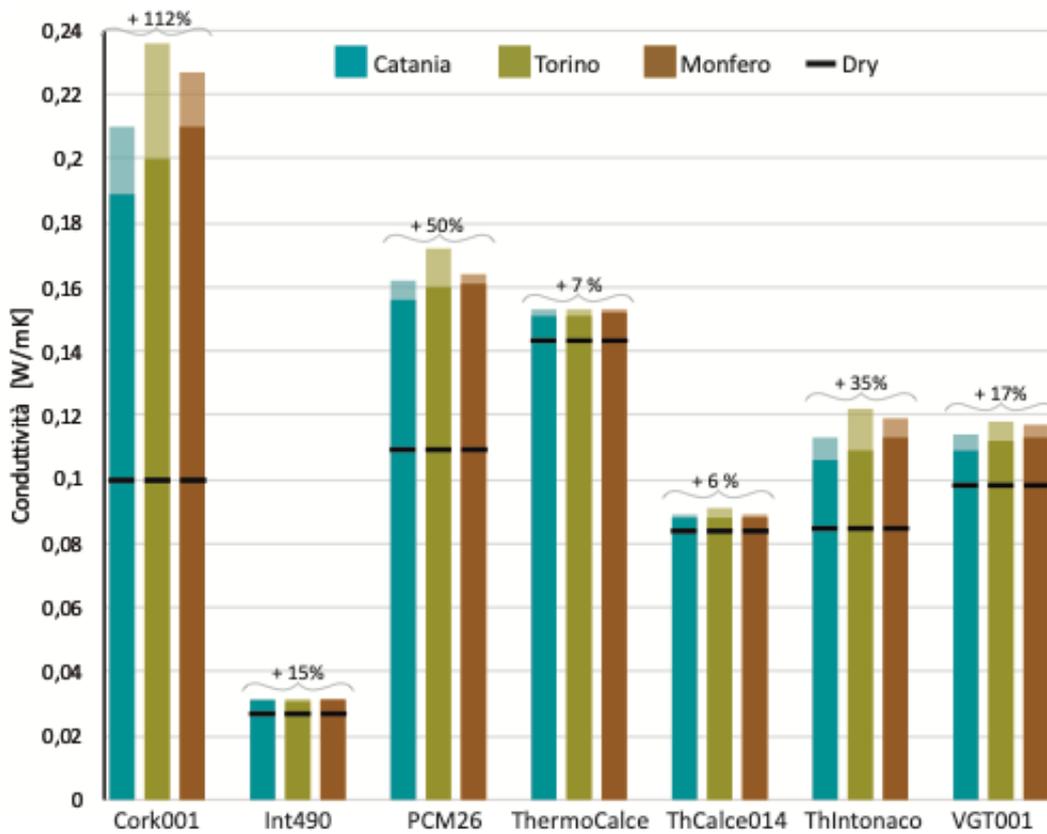


Grafico 17 Risultati nella stratigrafia Intercapedine: variazione di conduttività negli isolanti

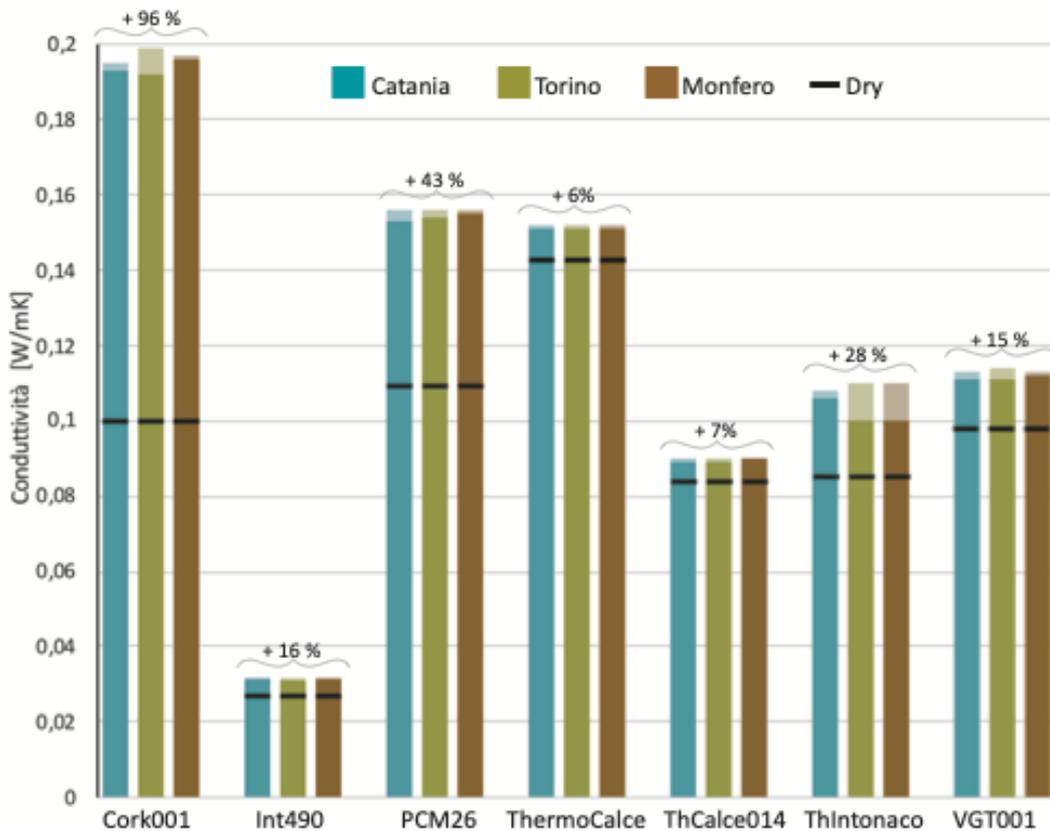
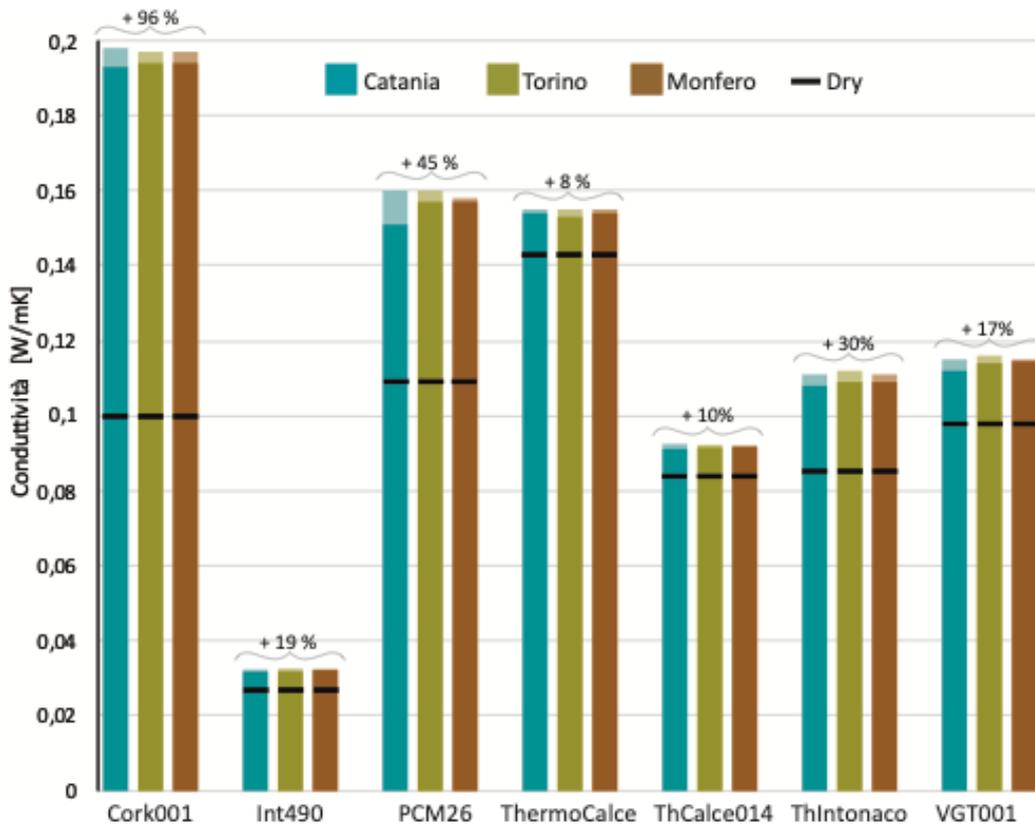


Grafico 18 Risultati nella stratigrafia Mattoni: variazione di conduttività negli isolanti



5.6.2.2. L'influenza della zona climatica

Il Grafico 19, il Grafico 20 e il Grafico 21 mettono a confronto il comportamento dei diversi isolanti nella medesima condizione climatica, ma quando applicati su supporti murari differenti. Sono riportati i valori di conduttività termica massimi e minimi ottenuti dalle simulazioni e il valore a secco. Sono state rappresentate le differenze percentuali medie tra il valore calcolato e quello a secco, per ogni zona climatica (valori riportati dalle parentesi graffe).

Come esplicitato nel precedente paragrafo a subire gli incrementi maggiori della conduttività termica dal valore a secco è il Cork001, seguito dal PCM26, ma le variazioni di questi incrementi tra le diverse zone climatiche sono rispettivamente contenute al 6% e al 4%.

L'unico caso in cui si riscontrano variazioni più sensibili è nel ThermoIntonaco: a Torino l'incremento di conduttività risulta pari al 33%, a Catania del 29%, ciò si traduce con una differenza percentuale tra le due città pari quasi al 14%.

Si ritiene quindi trascurabile l'influenza esercitata dalla zona climatica sulla variazione di conduttività termica dei materiali analizzati. Si ritiene che ciò sia dovuto alle modalità applicative degli intonaci termici: applicati internamente al paramento murario risultano "protetti" e quindi risentono poco delle sollecitazioni termiche e igometriche esterne.

Grafico 19 Risultati a Torino: variazione di conduttività negli isolanti

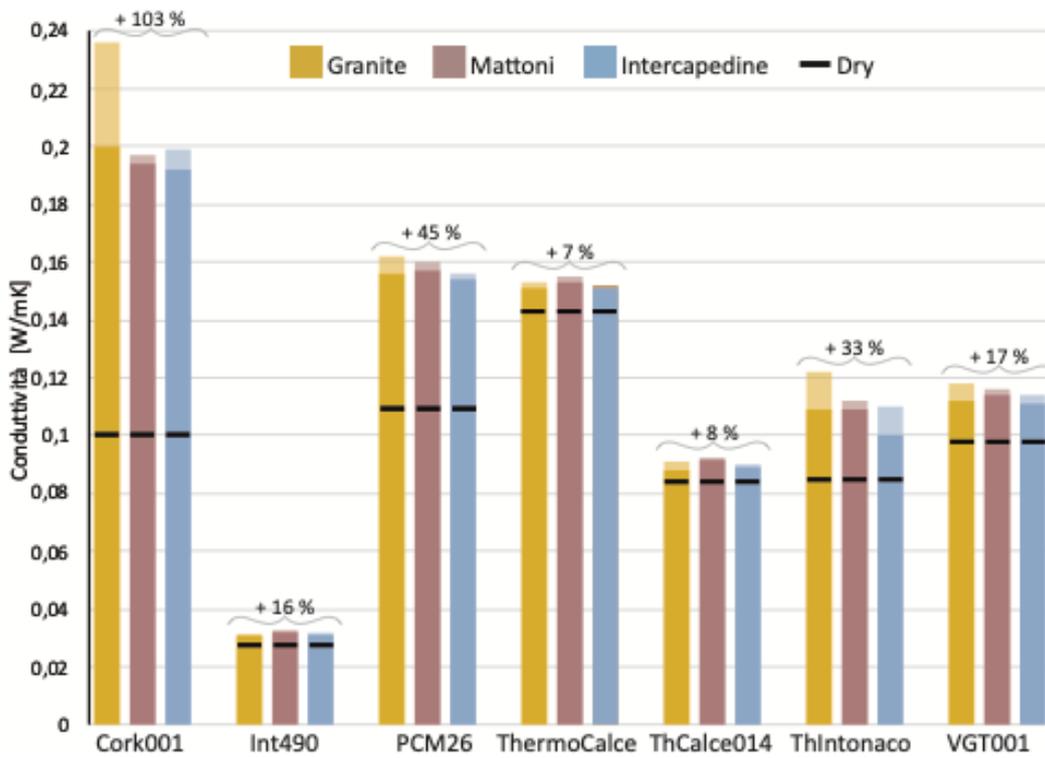


Grafico 20 Risultati a Catania: variazione di conduttività negli isolanti

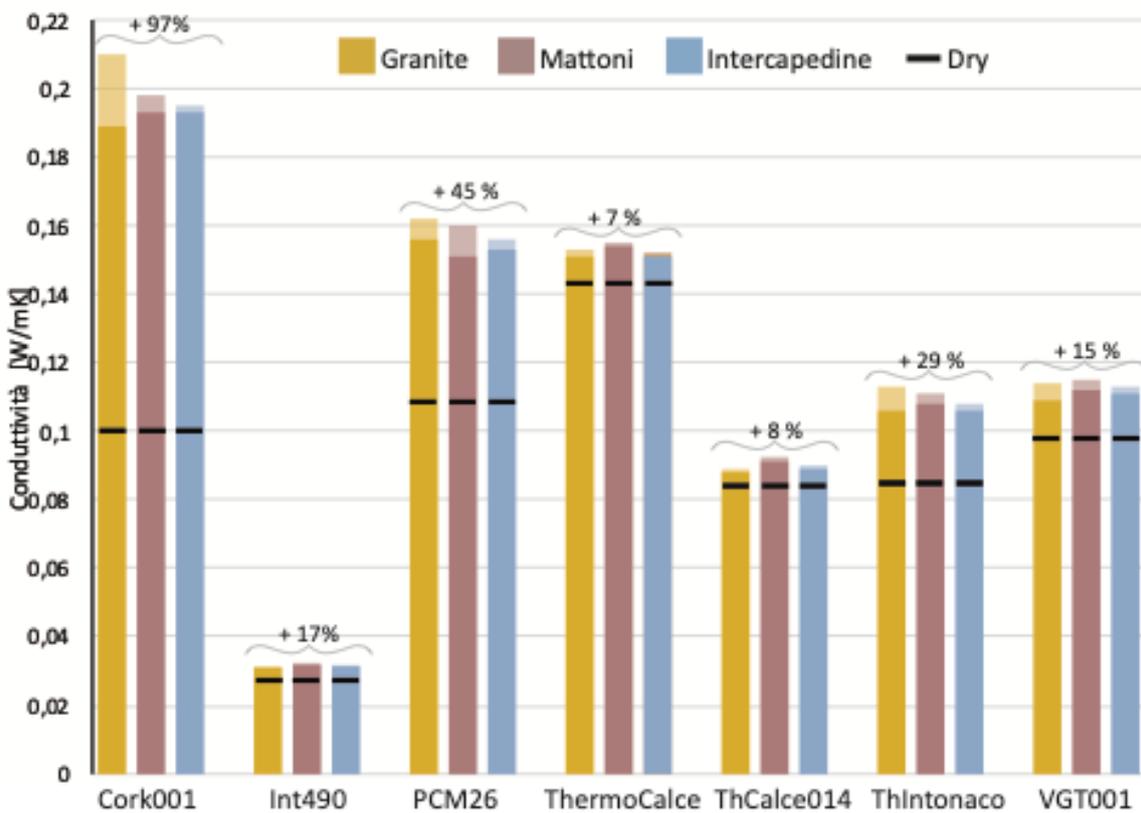
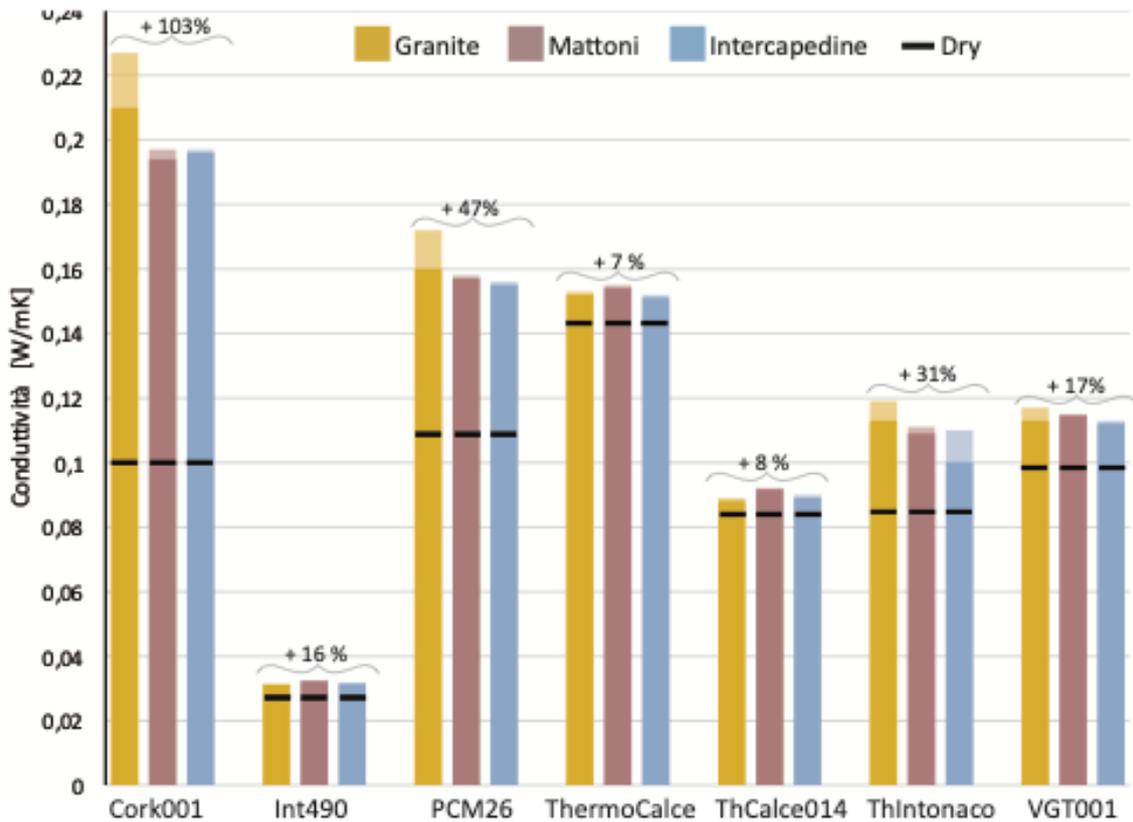


Grafico 21 Risultati a Monfero: variazione di conduttività negli isolanti



5.6.3. La variazione di trasmittanza della parete

Per effettuare il calcolo della trasmittanza la metodologia standard fa riferimento alla UNI EN ISO 6946:2008 [130] che ne descrive il calcolo in condizioni stazionarie. Anche in questo caso si fa riferimento ai valori di conduttività dei materiali secchi e trattandosi di condizioni stazionarie molti fenomeni tra cui l'accumulo termico o la migrazione del vapore non sono presi in considerazione. Simulare il comportamento di una struttura in regime dinamico e igrotermico permette di valutare le differenze tra i risultati ottenibili dalle due metodologie di calcolo: la presente tesi vuole porre l'attenzione su tali differenze, a volte sostanziali.

Le trasmittanze calcolate secondo normativa risultano infatti sempre più basse rispetto quelle ottenute tramite le simulazioni, in quanto non considerano l'umidità ed i suoi effetti sui materiali. Ciò si traduce in parametri che non descrivono in modo realistico il comportamento dei componenti murari ed in generale di tutto un edificio, la conseguenza è quella di basare la propria progettazione su dati inesatti e sottostimare il fabbisogno energetico dell'edificio.

La variazione di conduttività vista precedentemente negli isolanti, porta inevitabilmente alla variazione dei valori di trasmittanza della parete. Come prevedibile, le configurazioni che presentano le maggiori differenze rispetto al calcolo stazionario sono quelle in cui sono applicati gli intonaci Cork001, che presentano una trasmittanza media il 34% superiore (v. par. 10.1; 10.2; 10.3), e a seguire PCM26 che presentano valori più elevati di circa il 19% (v. par. 10.7; 10.8; 10.9).

Le configurazioni con il ThermoIntonaco riportano un incremento della trasmittanza del 18% nella configurazione granite, incremento che diminuisce nelle altre due stratigrafie con valori del 14% nell'intercapedine e dell'11% nel muro in mattoni.

Le stratigrafie che presentano distaccamenti di trasmittanza più contenuti rispetto al calcolo stazionario sono l'Int490, contenente aerogel e il VGT001, costituito da aggregati di origine minerale e vegetale. Queste stratigrafie subiscono incrementi rispettivamente del 12% e del 10%. Le variazioni di trasmittanza però sono dovute anche alla presenza di umidità all'interno degli altri materiali che compongono le stratigrafie e questo è ben visibile nelle configurazioni con il ThermoCalce e Thermocalce014. Le due stratigrafie infatti presentano una differenza media di trasmittanza tra il metodo di calcolo della normativa e quello simulato, del 14%, quando, come abbiamo visto nel paragrafo precedente, la conduttività degli isolanti varia di non più dell'10% (v. par. 10.10; 10.11; 10.12; 10.13; 10.14; 10.15). Questo significa che vi è umidità anche all'interno del supporto murario e i valori delle conduttività risultano maggiorati in quanto i materiali non sono completamente secchi.

5.6.3.1. L'influenza della base muraria

Il Grafico 22, Grafico 23 e Grafico 24 riporta, per le relative tipologie murarie, i valori di trasmittanza termica minimi e massimi ottenuti nelle singole località e il valore calcolato tramite la normativa. Inoltre sono state rappresentate le differenze percentuali medie tra le due tipologie di calcolo, per ogni configurazione muraria (valori riportati dalle parentesi graffe).

Le variazioni di trasmittanza riportano, nella maggior parte dei casi analizzati, incrementi maggiori nella stratigrafia in granite: le applicazioni con il Cork001, PCM26 e ThermoIntonaco registrano incrementi rispettivamente del 45%, 22% e 18%. Incrementi decisamente più contenuti, di circa il 10% rispetto i valori calcolati in condizioni stazionarie, sono rilevati nelle restanti composizioni. Le applicazioni con il Cork001 e PCM26 subiscono i maggiori incrementi anche quando applicati sulla base muraria in mattoni con intercapedine d'aria, e presentano variazioni del 32% e 19%. Anche in questo caso le restanti combinazioni sembrano essere meno soggette alla variazione di trasmittanza, registrando incrementi medi del 10% rispetto le condizioni stazionarie.

A subire perdite prestazionali più contenute sono invece le stratigrafie ad avere base muraria in mattoni pieni, dove gli incrementi rispetto i valori calcolati tramite normativa, non superano il 24%, ciò avviene quando l'isolante è il Cork001. Invece è interessante notare come in questa casistica le composizioni con il Thermocalce e il ThermoCalce014 presentano scostamenti dalla normativa maggiori, rispettivamente del 14% e 16%, rispetto le stratigrafie granite e intercapedine.

Risulta quindi evidente come i valori finali delle trasmittanze termiche ottenute tramite le simulazioni non siano influenzate solo dalla presenza e dal comportamento dall'intonaco isolante.

Tutti i materiali che compongono le stratigrafie analizzate sono soggetti, per diversi fattori, a variazioni di conduttività termica: questo porta al conseguente aumento della trasmittanza termica della parete. Si può quindi affermare che, tra quelle analizzate, non ci sono stratigrafie che risentono più di altre della presenza di umidità, a prescindere da che tipo di materiali sia composta la parete notiamo differenze di trasmittanza, rispetto la normativa UNI EN ISO 6946:2008 [130] maggiori del 10%.

Grafico 22 Risultati nella stratigrafia Granite: variazione di trasmittanza

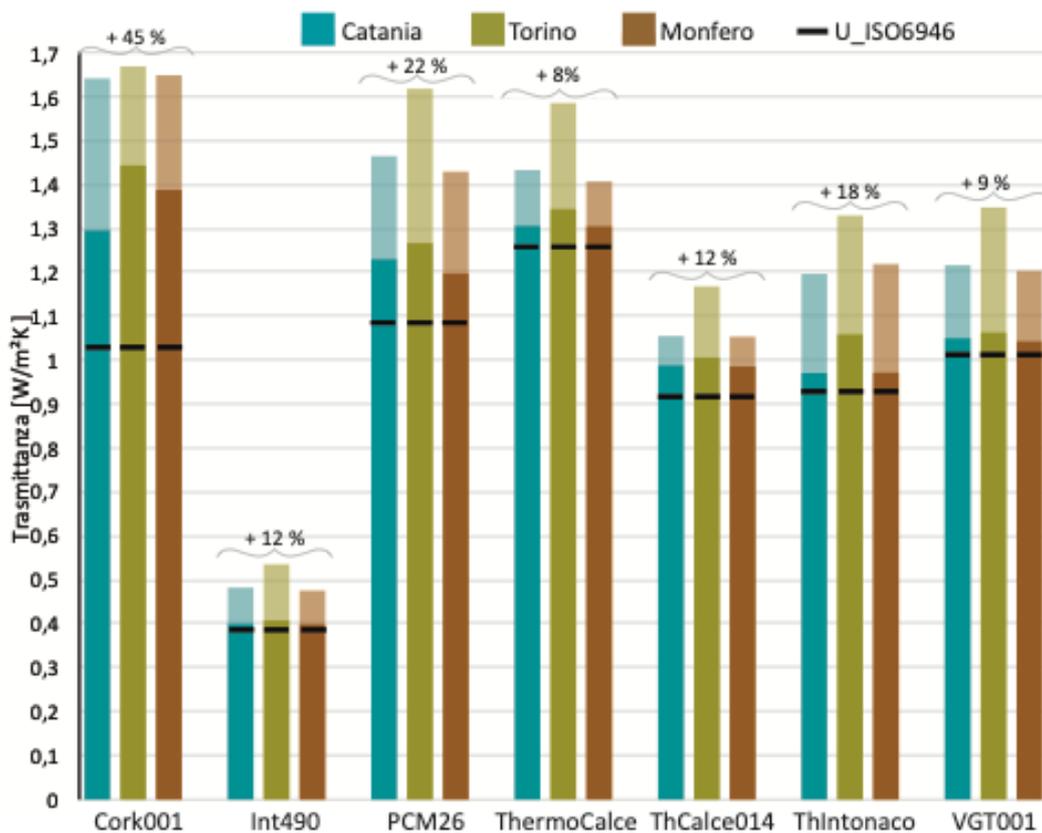


Grafico 23 Risultati nella stratigrafia Intercapedine: variazione di trasmittanza

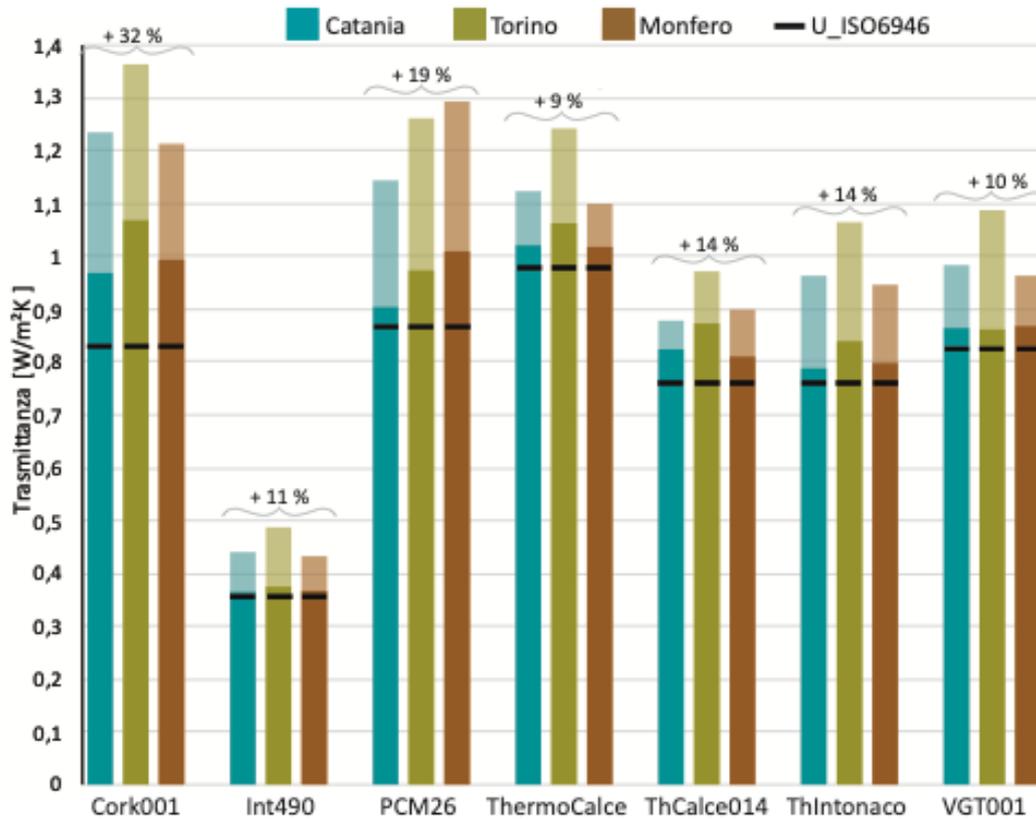
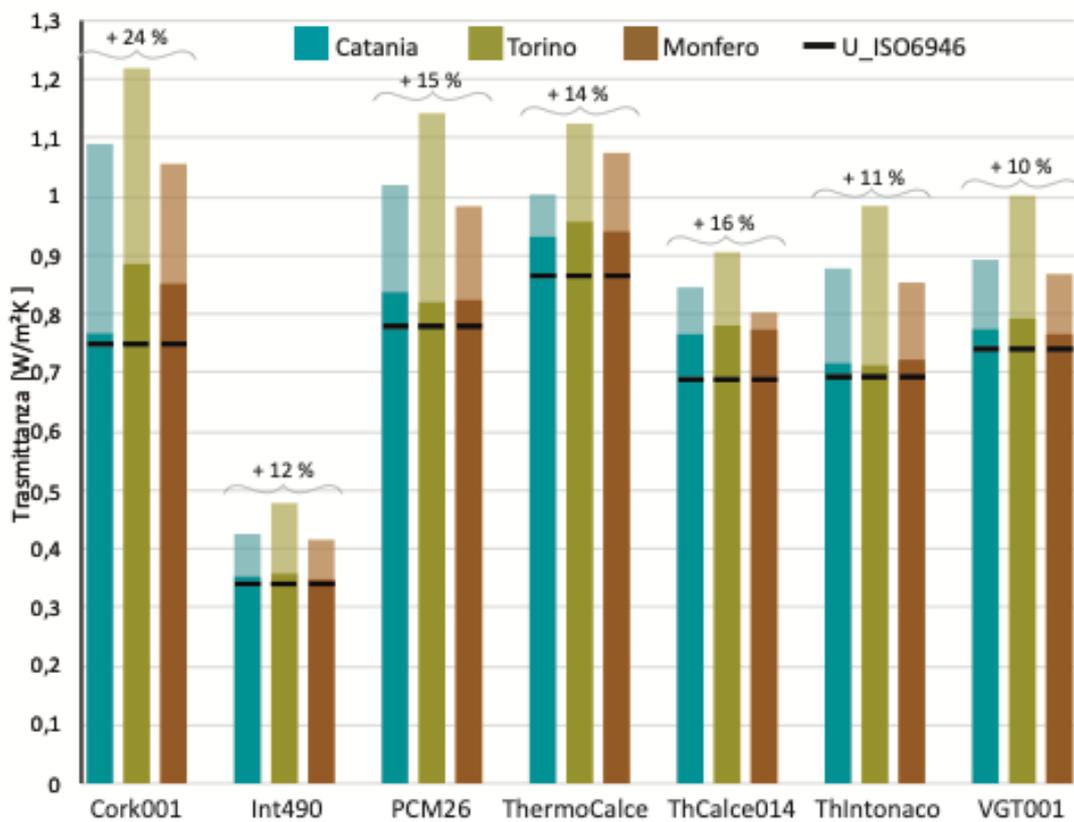


Grafico 24 Risultati nella stratigrafia Mattoni: variazione di trasmittanza



5.6.3.2. L'influenza della zona climatica

Il Grafico 25, Grafico 26 e Grafico 27 riportano, per le relative città, i valori di trasmittanza termica minimi e massimi ottenuti nelle singole tipologie murarie, e il valore calcolato tramite la normativa. Inoltre sono state rappresentate le differenze percentuali medie tra le due tipologie di calcolo, per ogni zona climatica (valori riportati dalle parentesi graffe).

Nella maggior parte dei casi analizzati i valori di trasmittanza più elevati e quindi che più differiscono dal calcolo in regime stazionario, sono stati rilevati a Torino, essendo tra le tre la località certamente più umida. In particolare notiamo come, nella configurazione granite vi sia un incremento medio del 20%, a Catania questo incremento risulta essere pari al 16%. Ciò si traduce in una differenza percentuale tra le due città pari al 25%. Nella stratigrafia intercapedine questa differenza percentuale tra le due città risulta ancora maggiore, arrivando al 38%, sintomo del fatto che a risentire delle condizioni climatiche esterne non è solo l'intonaco isolante ma tutta la parete.

I risultati ottenuti per Monfero rivelano incrementi più contenuti rispetto a Torino e poco più elevati (+3%) rispetto i risultati ottenuti per Catania.

Per tutte e tre le località analizzate gli incrementi maggiori sono stati riscontrati nella stratigrafia granite seguita da quella in mattoni con l'intercapedine d'aria. Come esplicitato precedentemente infatti la muratura in granite è quella ad avere spessore più contenuto e non presenta rivestimenti esterni che possano fungere da protezione per gli strati più interni. Ciò comporta una maggiore sollecitazione degli intonaci isolanti agli sbalzi di temperatura e umidità: questi fattori influiscono quindi sulla conduttività termica dei materiali con il conseguente aumento di trasmittanza termica della parete.

In definitiva gli scostamenti maggiori si registrano nelle località con un clima più freddo e umido. Considerando il fatto che consumi ed emissioni di CO₂ dipendono da tempo e dispersioni, laddove il periodo di riscaldamento è più lungo, con un calcolo semplificato si rischia di sottostimare maggiormente le dispersioni. Quindi dall'analisi condotta in base alle diverse condizioni climatiche lo scostamento della trasmittanza simulata rispetto quella a secco, se pur minima, riteniamo abbia effetti non trascurabili.

Grafico 25 Risultati a Torino: variazione di trasmittanza

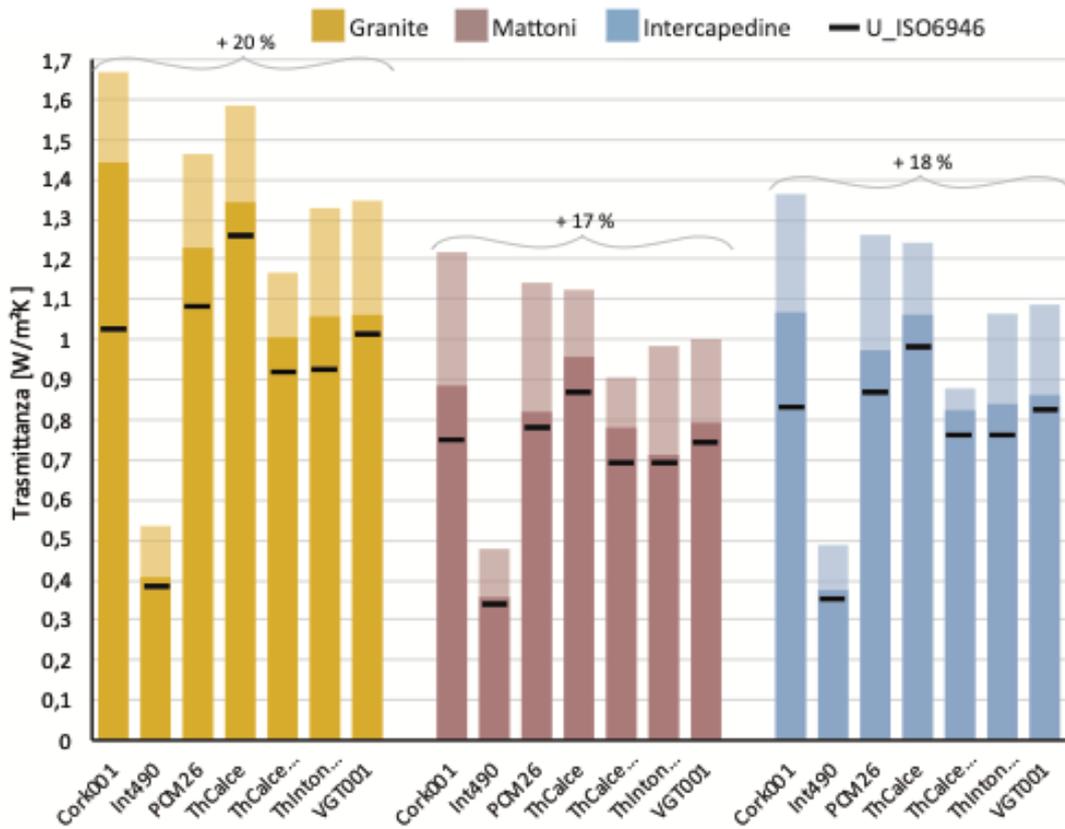


Grafico 26 Risultati a Catania: variazione di trasmittanza

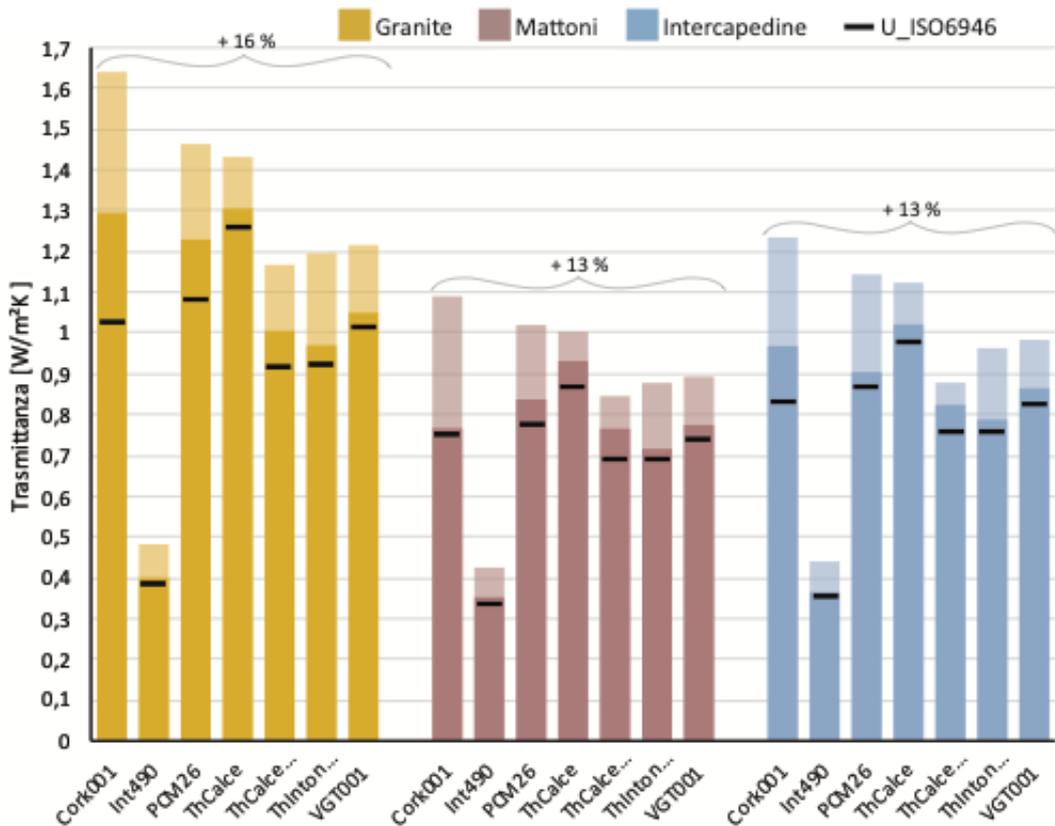
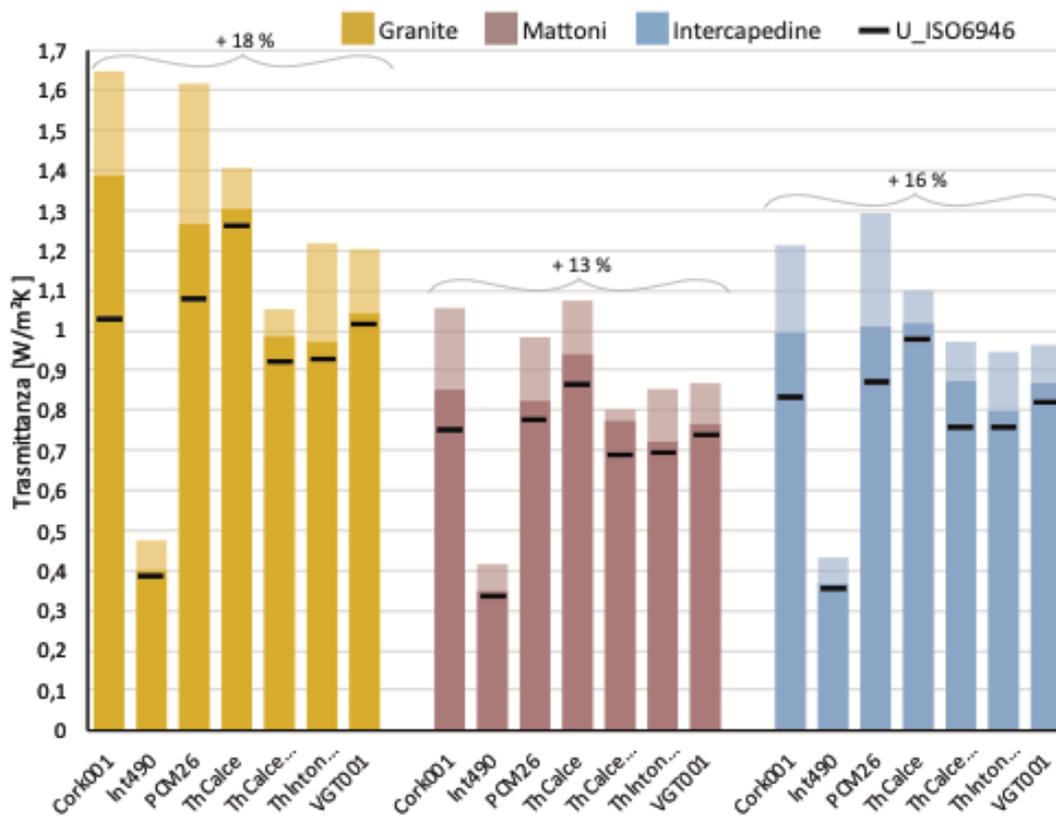


Grafico 27 Risultati a Monfero: variazione di trasmittanza



5.6.4. Rischio di condensa e crescita di muffe

La formazione di condensa, superficiale o interstiziale, è uno dei problemi che compaiono più frequentemente quando si parla di interventi di retrofit energetico. I materiali isolanti spesso oltre a limitare il passaggio del calore, inibiscono anche il passaggio del vapore e ciò può causare fenomeni di condensa. Questo fenomeno, se trascurato, può portare alla proliferazione di microrganismi come muffe e funghi che compromettono la salubrità dell'aria e quindi la salute umana.

Il software Wufi Pro permette di valutare questi rischi tramite il confronto dei profili di temperatura interna dei materiali con quelli di temperatura di rugiada. Qualora il profilo di temperatura del materiale sia più basso o tocchi il profilo di temperatura di rugiada, allora c'è pericolo di condensa, ed è necessario escludere dalle possibili scelte progettuali quel tipo di configurazione.

Anche per quello che riguarda la crescita di muffe il programma permette di fare delle valutazioni sulla probabilità di incorrere nel fenomeno. Se le condizioni termo-igrometriche interne si trovano al di sotto di questa curva si può escludere la formazione di muffe.

La Tabella 16 riporta gli esiti delle simulazioni per quello che riguarda la formazione di condensa interstiziale.

Tra i materiali analizzati sono state riscontrate criticità solo per l'Int490: applicato su una base muraria in granite, si incorre nella formazione di condensa interstiziale. Nel caso di Torino notiamo come la presenza di condensa porti anche alla formazione di muffe che sono una delle principali cause dell'insalubrità dell'aria. La condensa interstiziale si verifica anche nella base muraria in mattoni pieni quando simulata nella località di Torino.

Il materiale presenta il coefficiente al passaggio del vapore più basso tra i materiali analizzati, di 1,77 ed è caratterizzato da valori di conduttività termica molto ridotti, non solo tra le nuove formulazioni indagate ma considerando anche gli intonaci isolanti presenti sul mercato.

Risulta fondamentale valutare attentamente l'utilizzo di questo prodotto e le sue possibili applicazioni poiché quando accostato a materiali con conduttività termica molto più elevata o con permeabilità al vapore differenti può portare alla formazione di condensa.

Tabella 16 Verifica assenza di condensa e muffe

MATERIALI	GRANITE			INTERCAPEDINE			MATTONI		
	TO	CT	MO	TO	CT	MO	TO	CT	MO
Cork001	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Int490		✗	✗	✓	✓	✓	✗	✓	✓
PCM26	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
ThermoCalce	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
ThermoCalce014	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
ThermoIntonaco	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
VGT001	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

✓ Non si forma condensa

✗ Si forma condensa

 Possibile formazione di muffe

6. Conclusioni

Il presente lavoro di tesi si pone l'obiettivo di caratterizzare le proprietà termoigrometriche di intonaci isolanti di nuova generazione al fine di capire quali siano le composizioni più efficienti e competitive, che rispondano alle esigenze di un mercato in continua evoluzione. Il secondo passo è stato quello di prevederne il comportamento in opera tramite simulazioni igrometriche dinamiche per confrontare i risultati con quelli ottenuti con metodi semplificati e con le prescrizioni di legge, evidenziando eventuali scostamenti.

La fase di caratterizzazione, svolta presso il laboratorio del Politecnico di Torino, ha permesso di determinare le proprietà termoigrometriche dei nuovi intonaci formulati e di redigerne le schede tecniche.

Il test riguardante la determinazione della densità a secco ha evidenziato come vi sia una correlazione diretta tra densità e conduttività: i campioni con densità più bassa (Int490 $\rho = 140 \text{ kg/m}^3$, Sample D $\rho = 249 \text{ kg/m}^3$, Sample E $\rho = 315 \text{ kg/m}^3$) sono anche quelli a presentare i valori più bassi di conduttività.

E' emerso poi come le proprietà termoigrometriche dei campioni analizzati siano fortemente influenzate dal quantitativo di materiale isolante presente nella miscela. La conduttività termica infatti migliora all'aumentare del quantitativo di isolante, cosa che risulta evidente, ad esempio, nei campioni ThermoCalce, ThermoCalce014, ThermoCalce016 che presentano percentuali di perlite crescenti dal 25% al 40% in massa che portano la conduttività termica a variare tra 0,143 a 0,059 W/mK. Il provino a presentare il valore di conduttività termica più basso è stato l'Int490, contenente aerogel, con valori di 0,027 W/mK. E' importante sottolineare come le caratteristiche termiche più performanti si ottengono negli intonaci contenenti aerogel; infatti questo materiale presenta la conduttività termica più bassa di tutti gli altri isolanti utilizzati in questa ricerca e in generale di tutti gli isolanti attualmente presenti sul mercato.

Le curve di assorbimento presentano, per tutti i materiali analizzati, un ginocchio intorno a livelli di umidità relativa dell'80%. I materiali contenenti aggregati minerali presentano i valori di assorbimento d'acqua più bassi tra quelli studiati (ThermoCalce014 $u = 0,04 \text{ kg/kg}$ a 95% R.H.), mentre i campioni con contenuto d'acqua più elevato sono quelli contenenti aerogel (Int490 $u = 0,145 \text{ kg/kg}$ a 95% R.H. ; Sample A1 $u = 0,125 \text{ kg/kg}$ a 95% R.H.).

Riguardo al test per la determinazione del coefficiente di assorbimento d'acqua per capillarità non tutti i campioni risultano essere idonei per l'applicazione in esterno in quanto la norma UNI EN 998-1:2016 specifica come sia necessario rispettare il tetto di $0,40 \text{ Kg/m}^2 \text{ min}^{0,5}$.

Un altro test condotto riguarda la permeabilità al vapore: i campioni contenenti aggregati di origine minerale e polimerica riportano i valori mediamente più elevati per questo coefficiente (ThermoCalce014 $\mu = 9,08$; ThermoIntonaco $\mu = 6,7$), mentre i valori mediamente più bassi si riscontrano nei termointonaci a base aerogel (Int490 $\mu = 1,77$; Ras492 $\mu = 2,96$).

Obbiettivo ulteriore del presente lavoro è quello di confrontare i risultati ottenibili tramite l'applicazione della normativa UNI EN ISO 6946:2008, che si basa su calcoli termici in regime stazionario, con analisi in regime igrometrico dinamico, simulate con il software Wufi Pro. Dei numerosi campioni analizzati quindi, ne sono stati selezionati sette che si ritengono rappresentativi dell'insieme iniziale, costituiti da diverse tipologie di aggregato e con caratteristiche eterogenee. Inoltre, al fine di ottenere una valutazione completa sui possibili utilizzi e criticità dei diversi intonaci isolanti sono state simulate tre tipologie murarie (mattoni pieni, mattoni con intercapedine e granite) con l'intonaco isolante posto internamente, ubicate in tre città (Torino, Catania e Monfero) con caratteristiche meteorologiche differenti, per un totale di 63 simulazioni.

Delle tre tipologie murarie quella a subire maggiormente la presenza di umidità è quella di granite che, oltre ad avere lo spessore più contenuto, è costituita esclusivamente dallo strato di pietra. Le murature in mattoni pieni ed in mattoni con l'intercapedine d'aria, di costruzione senza dubbio molto più recenti, partono da valori di trasmittanza decisamente più ridotti e in tutte le simulazioni presentano comportamenti analoghi.

Dall'analisi si evince come la tipologia muraria sulla quale viene applicato l'intonaco isolante non influisce in modo considerevole sulle prestazioni di conduttività termica dello stesso: questo può essere dovuto al fatto che l'intonaco è applicato all'interno del paramento murario. E' sempre opportuno però valutare attentamente la scelta dell'isolante. In diverse casistiche infatti si assiste alla formazione di condensa interstiziale, in particolare nelle configurazioni Int490_Granite e nel caso Int490_mattoni_TO.

Una ulteriore analisi ha permesso di valutare se differenti condizioni climatiche influenzino le prestazioni degli isolanti e delle murature. In questo caso a subire gli incrementi di trasmittanza più alti sono, nella maggioranza dei casi, le simulazioni nella località di Torino, caratterizzata da inverni rigidi e valori di umidità relativa elevati sia in inverno che in estate, la località in cui l'acqua fatica maggiormente ad evaporare.

Questo porta alla constatazione che la sottostima della trasmittanza delle murature in città come Torino è percentualmente più onerosa che non in località con clima più mite.

L'analisi mette in luce come le attuali metodologie di calcolo, descritte dalle normative vigenti, non restituiscano valori sufficientemente attendibili: in tutte le simulazioni le trasmittanze ottenute in regime dinamico risultano maggiorate di almeno il 10% in quanto la presenza di umidità modifica le caratteristiche dei materiali. Utilizzare i valori di conduttività termica a secco porta a valori di trasmittanza che molto raramente corrispondono a quelli in situ e ciò porta inevitabilmente a sottostimare il fabbisogno energetico dell'edificio.

7. Ringraziamenti

Ora che mi trovo alla fine di questo percorso universitario ripenso a tutti i momenti e a tutte le persone che mi hanno arricchita e accompagnata in questa crescita. In particolare questo lavoro di tesi è stato fondamentale per la mia formazione in quanto ho avuto modo di vedere e sperimentare tematiche nuove a me molto care e perché mi ha permesso di capire quale direzione voglio dare ai miei studi.

Vorrei ringraziare la Professoressa Valentina Serra per avermi dato la possibilità di prendere parte a questo lavoro e per la disponibilità e l'interesse dimostrato durante l'intero percorso di tesi.

Un ringraziamento particolare è rivolto all'Architetto Stefano Fantucci e alla Dottoressa Elisa Fenoglio, pazienti e disponibili, sempre presenti e pronti a chiarire i miei dubbi e le mie continue domande. Grazie per il tempo dedicatomi e per la professionalità con cui mi avete trasmesso le vostre conoscenze, l'esperienza di ricerca mi ha dato la possibilità di confrontarmi con nuove tematiche e metodologie che hanno accresciuto in me la voglia di approfondire e migliorare il mio lavoro.

Ringrazio la mia famiglia, mia madre e mio padre, da sempre la mia forza e il mio punto di riferimento, senza di loro e senza il loro costante sostegno nessuna delle esperienze di questi anni sarebbe stata possibile.

Vorrei dedicare il presente lavoro a mio padre, perché a 30 anni di distanza e senza saperlo, mi sono ritrovata a seguire i suoi passi, ad appassionarmi alle stesse tematiche che hanno mosso in lui la voglia di conoscenza e innovazione e che oggi più che mai ci lega in modo indissolubile.

Infine, ultimi ma non meno importanti, vorrei ringraziare la mia "famiglia torinese", quegli amici che dal primo giorno di questa avventura mi sono stati accanto, sempre pronti a lottare insieme. Vorrei ringraziare ogni singola persona che in tutti questi anni mi ha fatto crescere, mi ha stimolata e mi ha arricchita donandomi il proprio tempo e il proprio affetto poiché è proprio grazie a voi se oggi sono diventata quella che sono, se oggi posso ritenermi fortunata.

8. Schede tecniche degli intonaci simulati

CORK001

General informations

Binders	Natural hydraulic lime, granulated corncob
Aggregates	Granulated cork and straw 25% by mass Perlite-Zeolite 20% by mass
Other compound	
Water ratio	-
Applications	Internal

Technical data

	Value	u.m.
ρ_{dry}	508	kg/m ³
$\lambda_{10,dry}$	0,1	W/mK
$\lambda_d (50\% 23^\circ\text{C})$	0,721	W/mK
c_p	988	J/kgK
μ	3,04	-
C_m	0,4889	kg/(m ² min ^{0,5})

Thermal conductivity as function of temperature

$T_{media} [^\circ\text{C}]$	10	25	40
$\lambda [W/mK]$	0,1	0,103	0,108

Thermal conductivity as function of moisture content

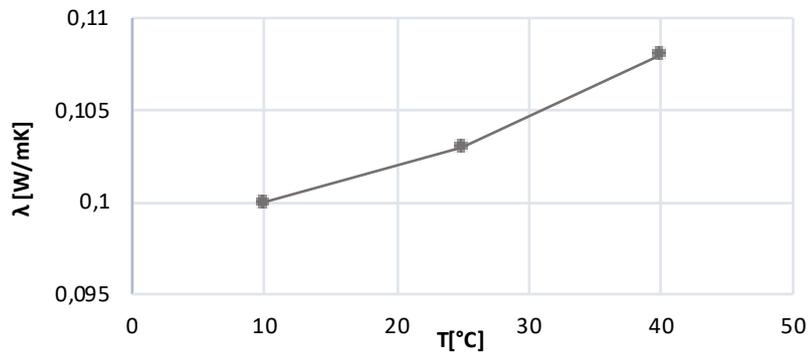
$m.c. [kg/m^3]$	0	361
$\lambda [W/mK]$	0,1	1,3

Moisture adsorption/desorption curves

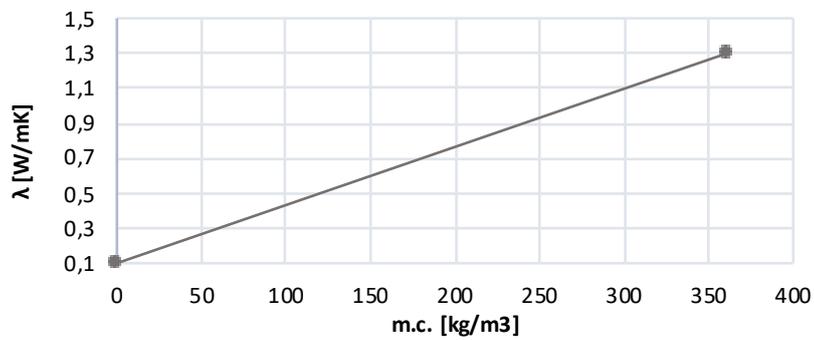
R.H. [%]	0%	55%	70%	80%	90%	95%
u [kg/kg]	0	0,01789	0,02428	0,03687	0,1002	0,11464

Enthalpy as function of temperature

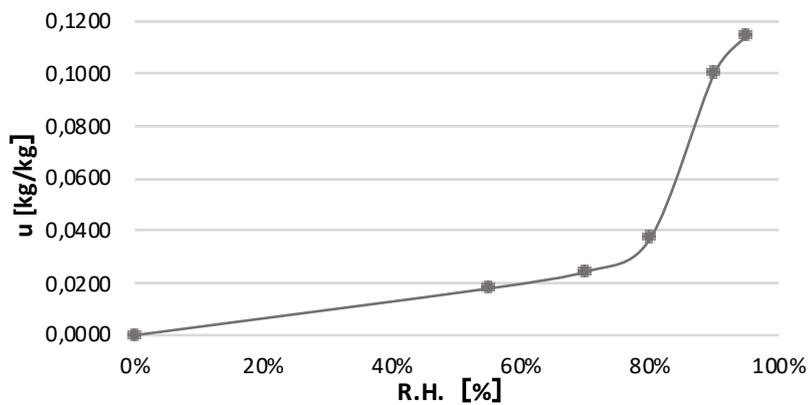
Conducivity as function of temperature



Conducivity as function of moisture content



Moisture adsorption/desorption curves



INT490

General informations

Binders	Mineral binders
Aggregates	Aerogel
Other compound	
Water ratio	-
Applications	Internal

Technical data

	Value	u.m.
ρ_{dry}	140	kg/m ³
$\lambda_{10,\text{dry}}$	0,027	W/mK
$\lambda_{\text{d}} (50\% \text{ } 23^{\circ}\text{C})$	0,0853	W/mK
c_p	998	J/kgK
μ	1,77	-
C_m	0,48	kg/(m ² min ^{0,5})

Thermal conductivity as function of temperature

$T_{\text{media}} [^{\circ}\text{C}]$	10	25	40
$\lambda [\text{W/mK}]$	0,027	0,0279	0,0294

Thermal conductivity as function of moisture content

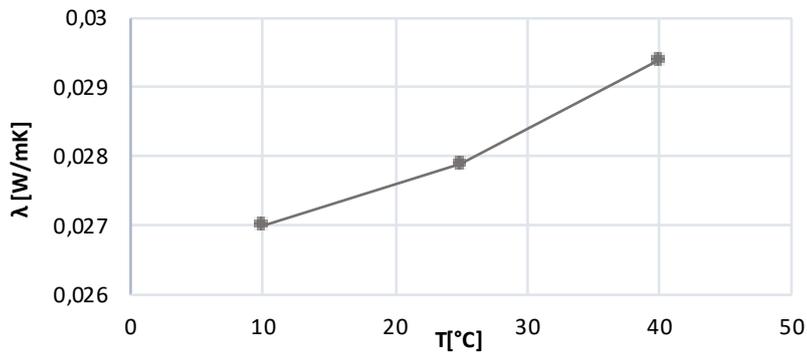
$m.c. [\text{kg/m}^3]$	0	370
$\lambda [\text{W/mK}]$	0,1	0,1435

Moisture adsorption/desorption curves

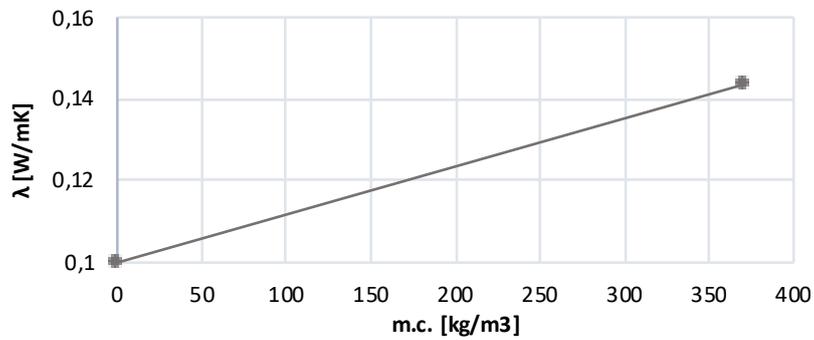
R.H. [%]	0%	55%	70%	80%	90%	95%
u [kg/kg]	0	0,037348	0,06369	0,07557	0,1115	0,14389

Enthalpy as function of temperature

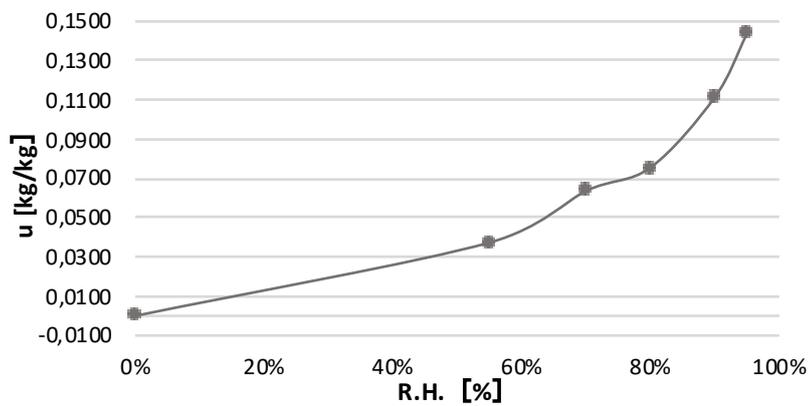
Conducivity as function of temperature



Conducivity as function of moisture content



Moisture adsorption/desorption curves



PCM26

General informations

Binders	Natural hydraulic lime, gypsum, calcium carbonate,
Aggregates	PCM micronal 14% by mass
Other compound	
Water ratio	-
Applications	Internal

Technical data

	Value	u.m.
ρ_{dry}	940	kg/m ³
$\lambda_{10,dry}$	0,1099	W/mK
$\lambda_d (50\% 23^\circ C)$	0,397	W/mK
c_p	1085	J/kgK
μ	6,1	-
C_m	0,126	kg/(m ² min ^{0,5})

Thermal conductivity as function of temperature

$T_{media} [^\circ C]$	6	21	36
$\lambda [W/mK]$	0,109	0,112	0,112

Thermal conductivity as function of moisture content

m.c. [kg/m³]	0	159,21
$\lambda [W/mK]$	0,1	0,67

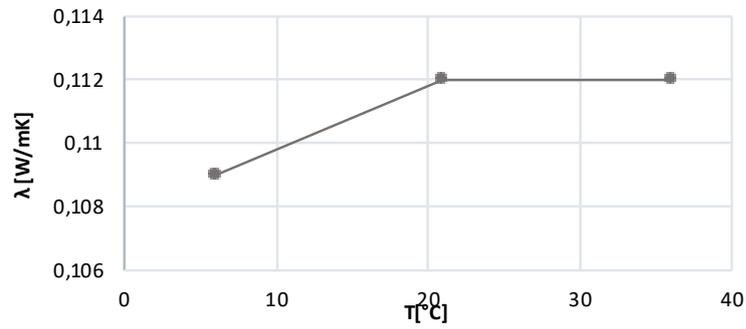
Moisture adsorption/desorption curves

R.H. [%]	0%	55%	70%	80%	90%	95%	100%
$u [kg/kg]$	0	0,0117	0,01595	0,03191	0,0638	0,10106	0,2893

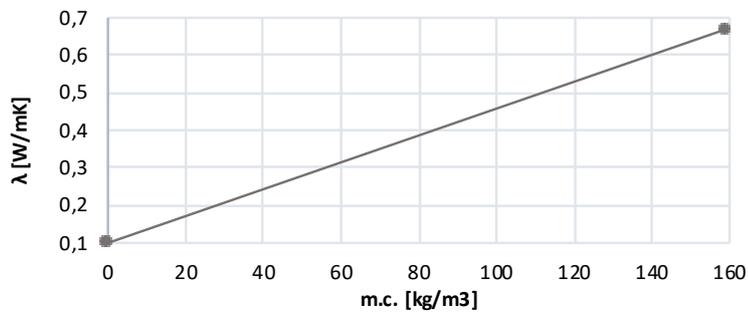
Enthalpy as function of temperature

13 °C	14 °C	15 °C	16 °C	17 °C	18 °C	19 °C	20 °C
1081	2162	3243	4324	5405	6556	7707	8928
21 °C	22 °C	23 °C	24 °C	25 °C	26 °C	27 °C	28 °C
10149	11580	13221	15142	17763	21714	28045	31086
29 °C	30 °C	31 °C	32 °C	33 °C			
32097	33108	34119	35130	36141			

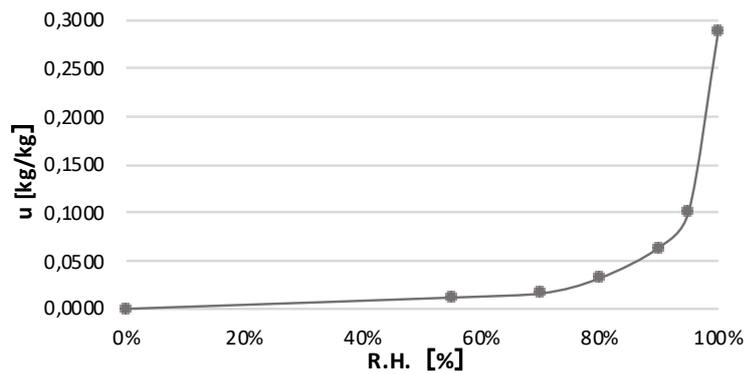
Conductivity as function of temperature



Conductivity as function of moisture content



Moisture adsorption/desorption curves



THERMOCALCE014

General informations

Binders	Natural hydraulic lime, Portland cement
Aggregates	Expanded perlite 30% by mass
Other compound	
Water ratio	-
Applications	Internal

Technical data

	Value	u.m.
ρ_{dry}	397	kg/m ³
$\lambda_{10,dry}$	0,084	W/mK
λ_d (50% 23°C)	0,1816	W/mK
c_p	850	J/kgK
μ	9,08	-
C_m	0,4428	kg/(m ² min ^{0,5})

Thermal conductivity as function of temperature

T_{media} [°C]	10	25
λ [W/mK]	0,084	0,08598

Thermal conductivity as function of moisture content

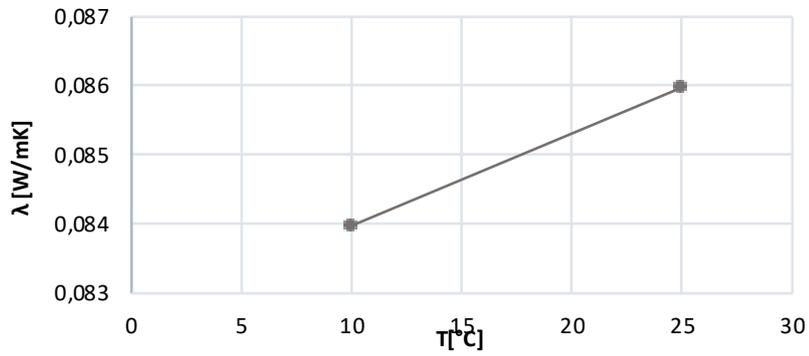
m.c. [kg/m ³]	0	167,2	212,8	243,2	273,6	288,8	304
λ [W/mK]	0,084	0,1874	0,2156	0,2344	0,2532	0,2626	0,272

Moisture adsorption/desorption curves

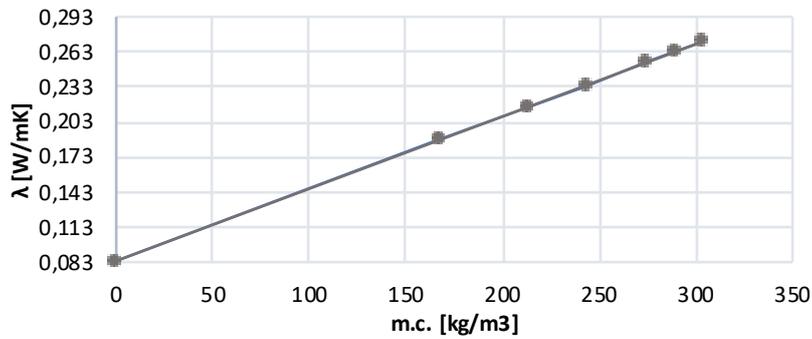
R.H. [%]	0%	55%	70%	80%	90%	95%
u [kg/kg]	0	0,0059	0,00757	0,01141	0,0246	0,04065

Enthalpy as function of temperature

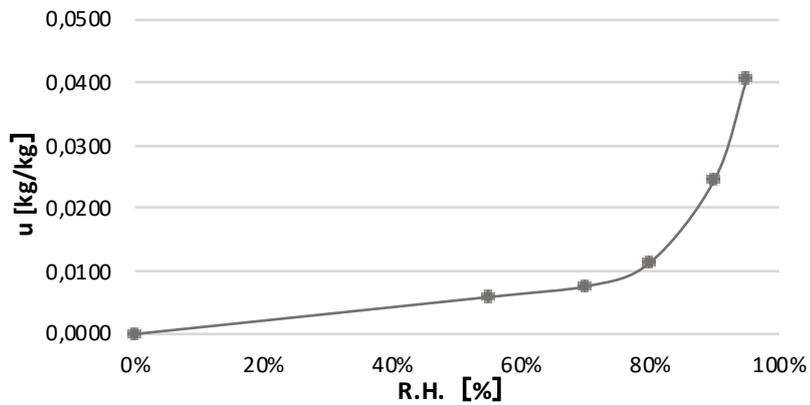
Conducivity as function of temperature



Conducivity as function of moisture content



Moisture adsorption/desorption curves



THERMOINTONACO

General informations

Binders	Natural hydraulic lime, Portland cement
Aggregates	EPS 6% by mass
Other compound	
Water ratio	-
Applications	Internal

Technical data

	Value	u.m.
ρ_{dry}	278	kg/m ³
$\lambda_{10,dry}$	0,085	W/mK
λ_d (50% 23°C)	0,5	W/mK
c_p	889	J/kgK
μ	6,7	-
C_m	0,2066	kg/(m ² min ^{0,5})

Thermal conductivity as function of temperature

T_{media} [°C]	10	25	40
λ [W/mK]	0,085	0,087	0,089

Thermal conductivity as function of moisture content

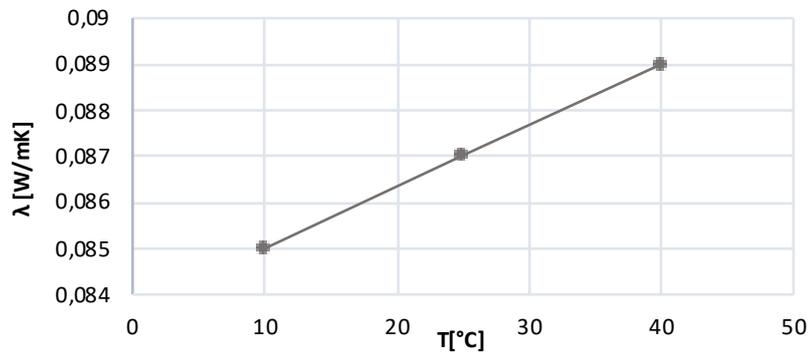
$m.c.$ [kg/m ³]	0	149
λ [W/mK]	0,085	0,9

Moisture adsorption/desorption curves

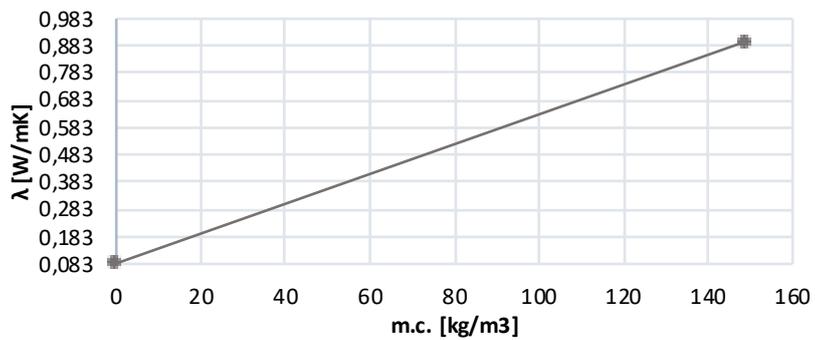
R.H. [%]	0%	55%	70%	80%	90%	95%
u [kg/kg]	0	0,0059	0,00757	0,01141	0,0246	0,04065

Enthalpy as function of temperature

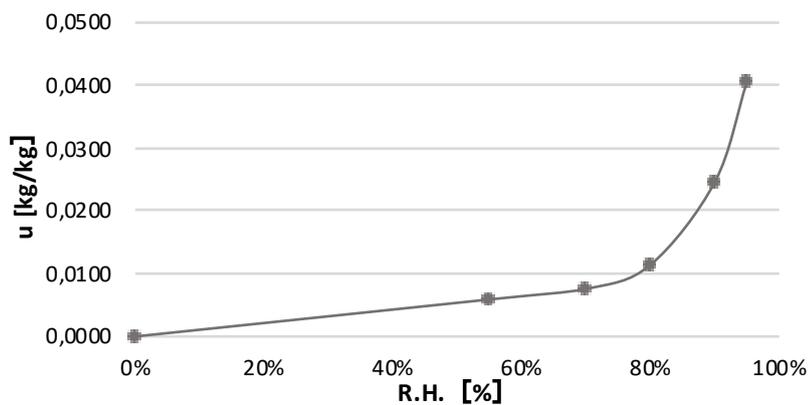
Conducivity as function of temperature



Conducivity as function of moisture content



Moisture adsorption/desorption curves



VGT001

General informations

Binders	Natural hydraulic lime
Aggregates	Expanded vermiculite, perlite 41% by mass Granulated corncob 10% by mass
Other compound	
Water ratio	-
Applications	Internal

Technical data

	Value	u.m.
ρ_{dry}	496	kg/m ³
$\lambda_{10,\text{dry}}$	0,098	W/mK
$\lambda_{\text{d}} (50\% 23^{\circ}\text{C})$	0,21	W/mK
c_p	975	J/kgK
μ	6,2	-
C_m	0,2574	kg/(m ² min ^{0,5})

Thermal conductivity as function of temperature

$T_{\text{media}} [^{\circ}\text{C}]$	10	25	40
$\lambda [W/mK]$	0,098	0,1	0,105

Thermal conductivity as function of moisture content

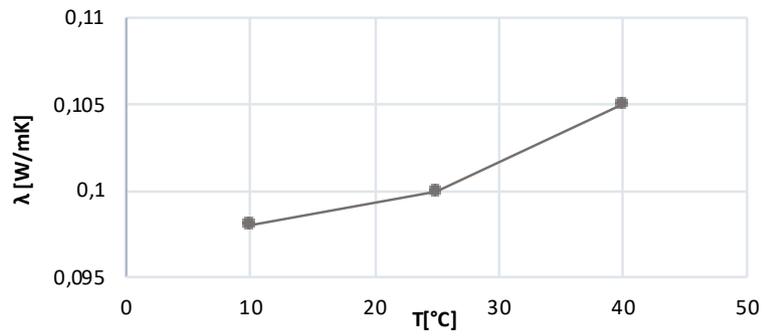
m.c. [kg/m ³]	0	192
$\lambda [W/mK]$	0,1	0,317

Moisture adsorption/desorption curves

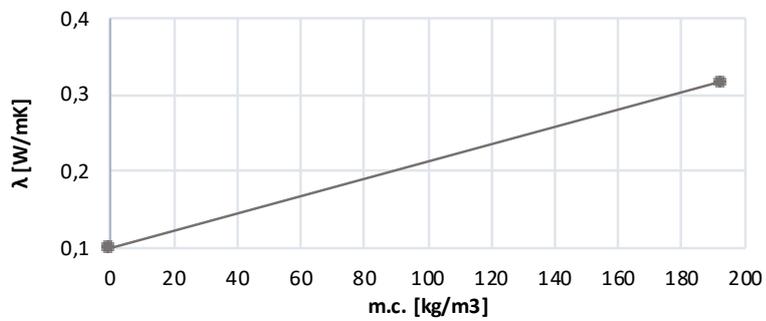
R.H. [%]	0%	55%	70%	80%	90%	95%
$u [kg/kg]$	0	0,01103	0,01504	0,02386	0,0714	0,07859

Enthalpy as function of temperature

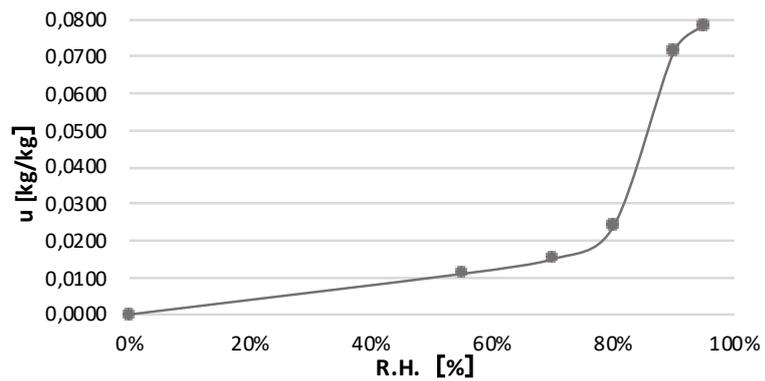
Conducivity as function of temperature



Conducivity as function of moisture content



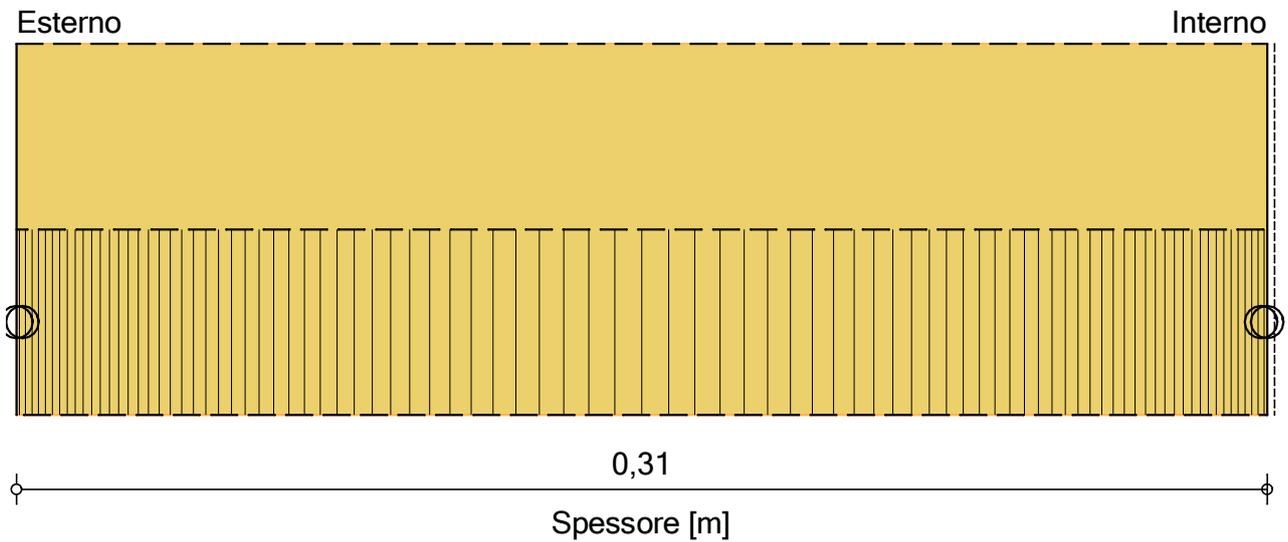
Moisture adsorption/desorption curves



9. Casi studio

stratigrafie e caratteristiche dei materiali su Wufi Pro

9.1. Stratigrafia Granite



○ - Posizioni di controllo

Materiali:

 - *Pietra GRANITE 0,31 m

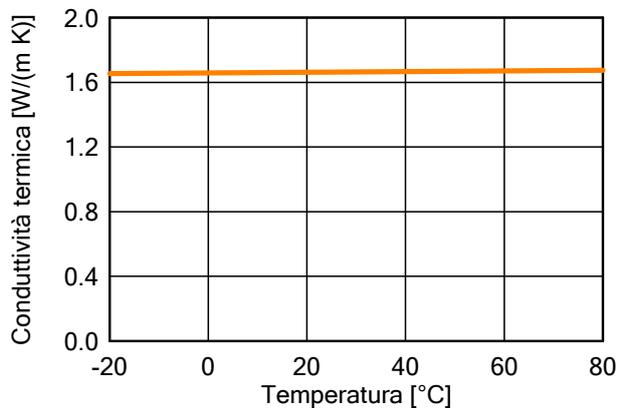
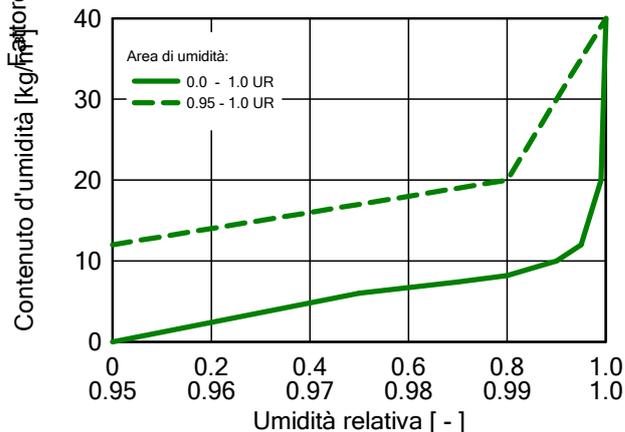
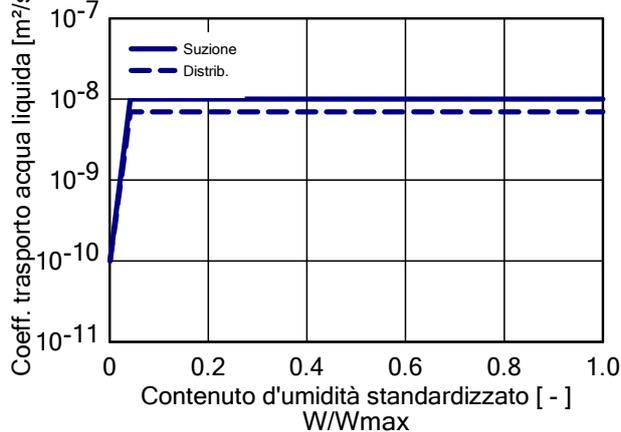
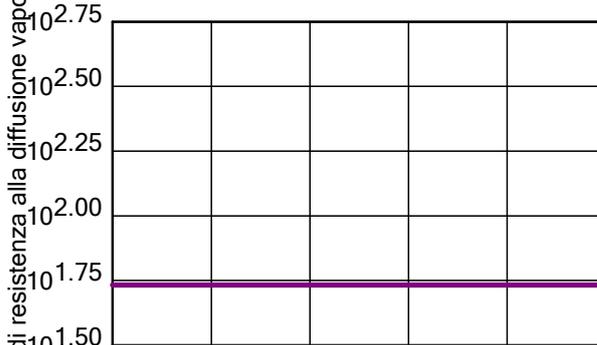
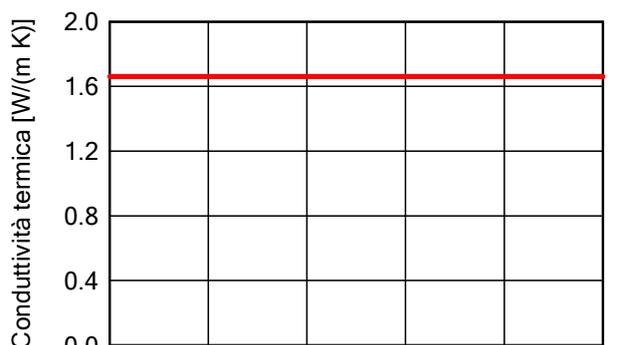
Spessore totale: 0,31 m

Resistenza termica: 0,37 [m² K/W]

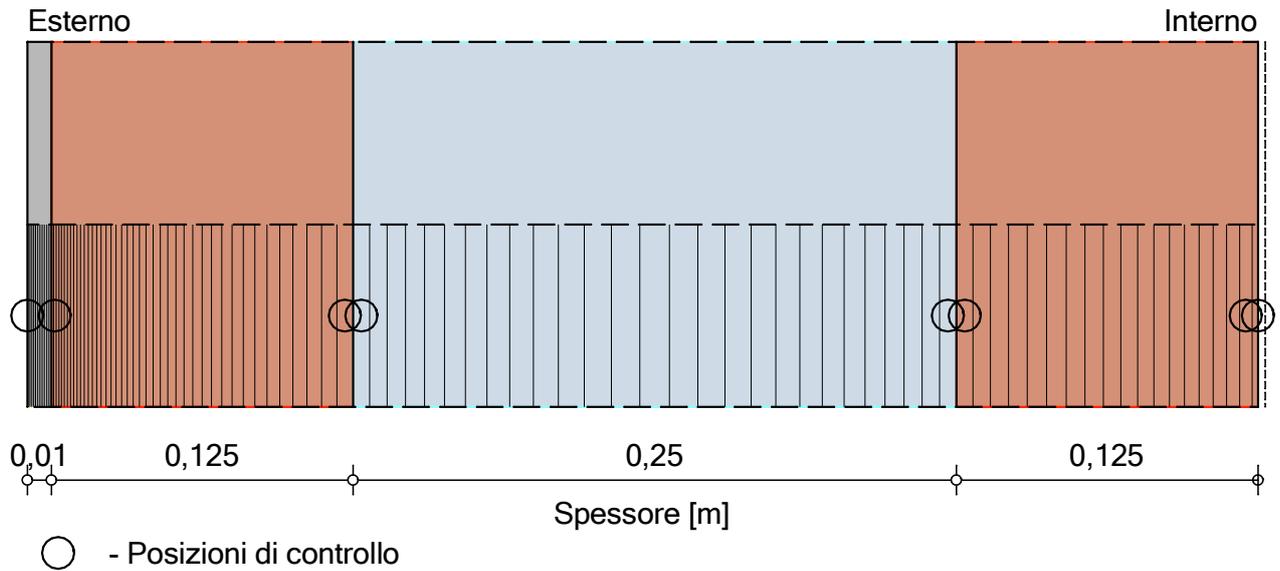
Trasmittanza termica: 2,69 [W/m² K]

Materiale: *Pietra GRANITE

Proprietà	Unità	Valore
Densità apparente	[kg/m ³]	2900
Porosità	[m ³ /m ³]	0.95
Capacità termica a secco	[J/(kg K)]	702
Conducibilità termica a secco, 10°C	[W/(m K)]	1.66
Fattore di resistenza alla diffusione di vapore	[-]	54
Supplemento conduttività termica, temp.	[W/(m K ²)]	2,00000E-4



9.2. Stratigrafia intercapedine



Materiali:

	- *Intonaco esterno	0,01 m
	- *Mattoni pieni cotti	0,125 m
	- *Strato d'aria	0,25 m
	- *Mattoni pieni cotti	0,125 m

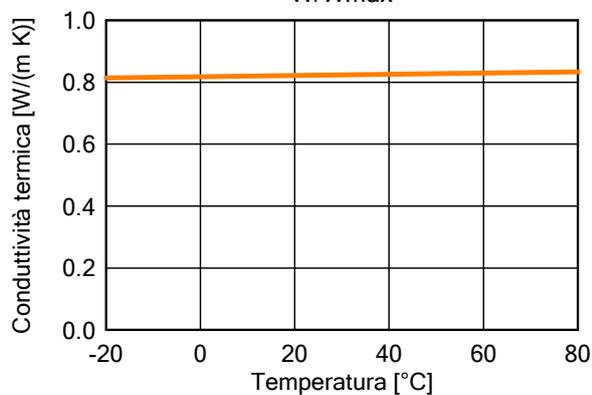
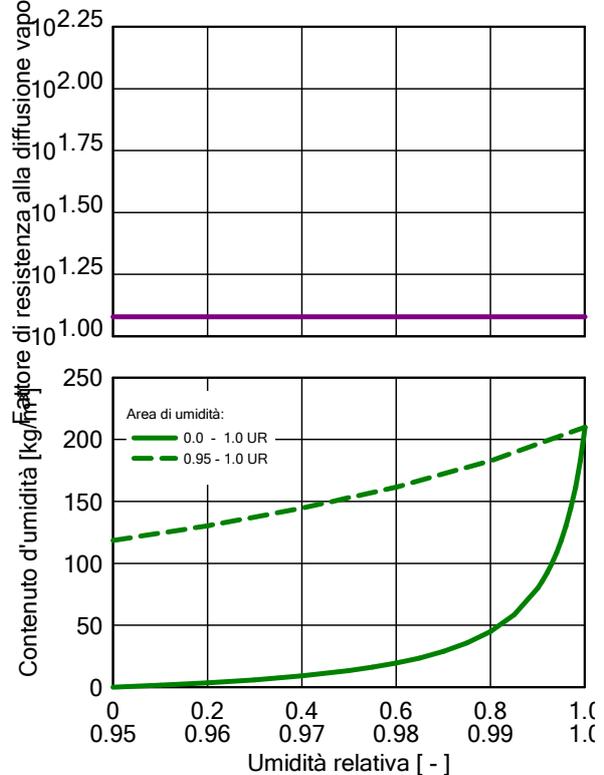
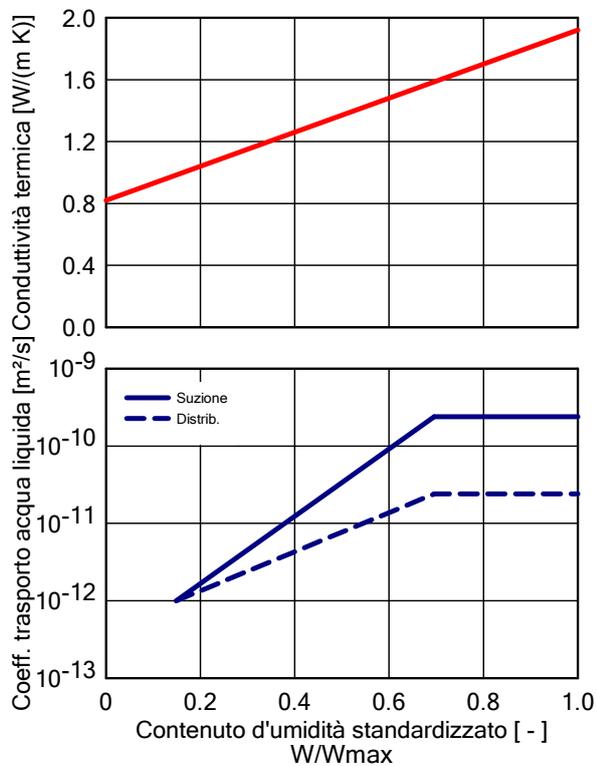
Spessore totale: 0,51 m

Resistenza termica: 0,59 [m² K/W]

Trasmittanza termica: 1,67 [W/m² K]

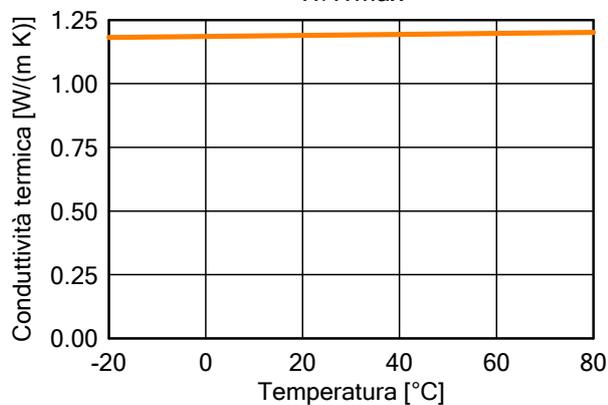
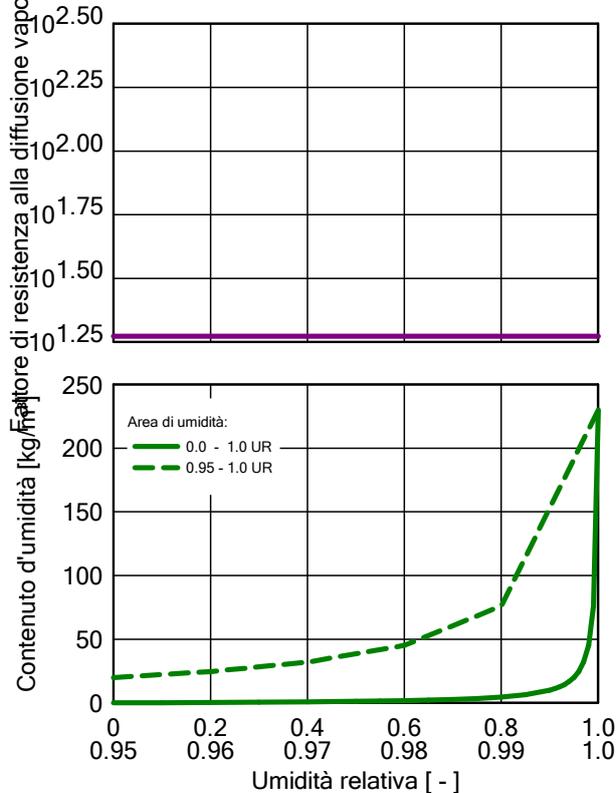
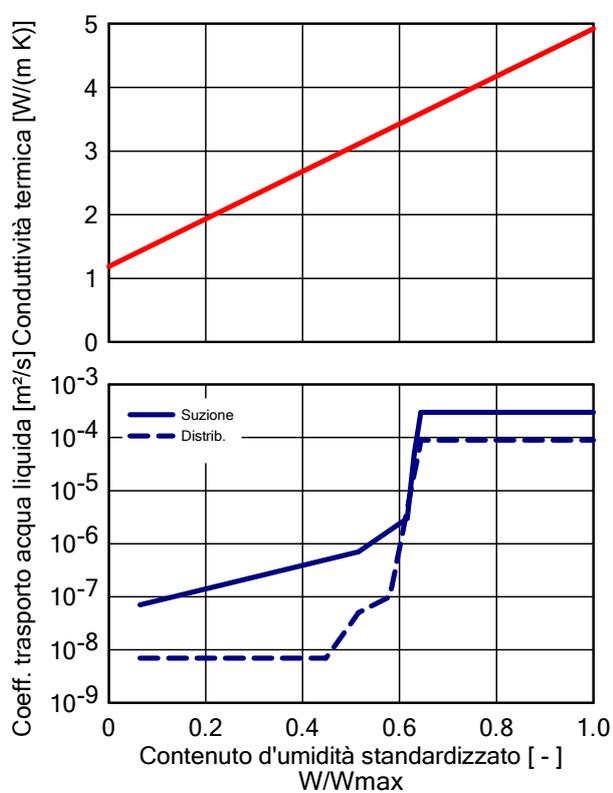
Materiale: *Intonaco esterno

Proprietà	Unità	Valore
Densità apparente	[kg/m ³]	1800
Porosità	[m ³ /m ³]	0,302
Capacità termica a secco	[J/(kg K)]	800
Conducibilità termica a secco, 10°C	[W/(m K)]	0,82
Fattore di resistenza alla diffusione di vapore	[-]	12
Contenuto d'umidità di riferimento	[kg/m ³]	45
Acqua di libera saturazione	[kg/m ³]	210
Coefficiente di assorbimento d'umidità	[kg/(m ² s ^{0.5})]	0.00167
Supplemento alla conducibilità termica, dip. umidità	[%/M.-%]	8
Supplemento conducibilità termica, temp.	[W/(m K ²)]	2,00000E-4



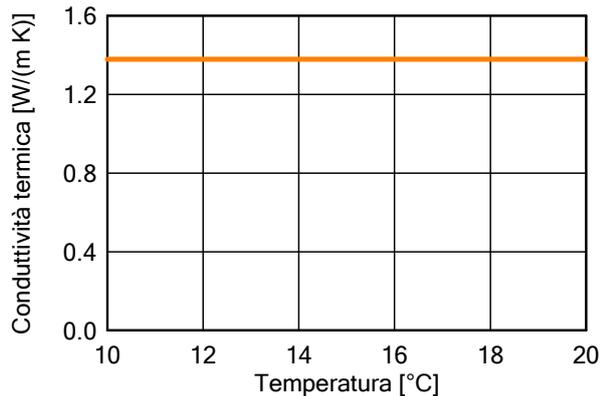
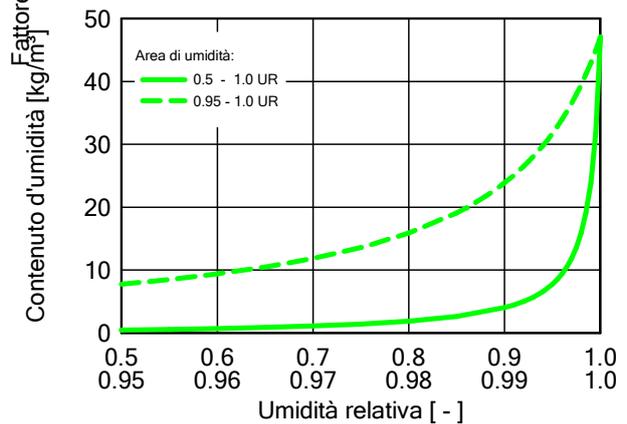
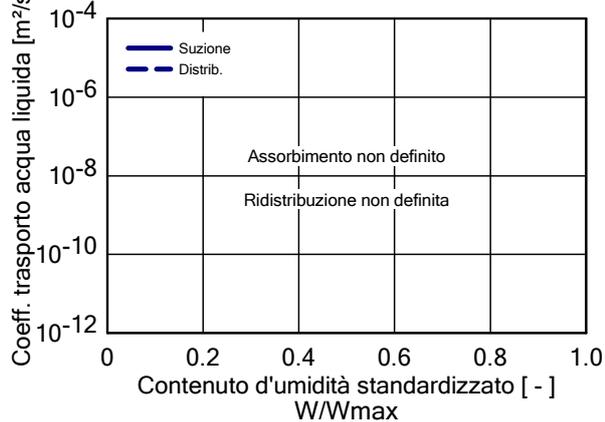
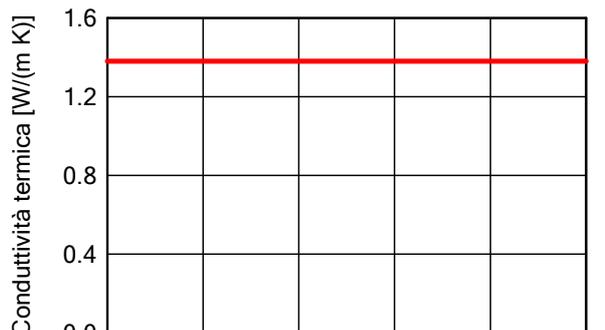
Materiale: *Mattoni pieni cotti

Proprietà	Unità	Valore
Densità apparente	[kg/m ³]	1704,6
Porosità	[m ³ /m ³]	0,357
Capacità termica a secco	[J/(kg K)]	890
Conducibilità termica a secco, 10°C	[W/(m K)]	1,188
Fattore di resistenza alla diffusione di vapore	[-]	18,744
Contenuto d'umidità di riferimento	[kg/m ³]	4.5
Acqua di libera saturazione	[kg/m ³]	230
Supplemento alla conducibilità termica, dip. umidità	[%/M.-%]	15
Supplemento conducibilità termica, temp.	[W/(m K ²)]	2,00000E-4

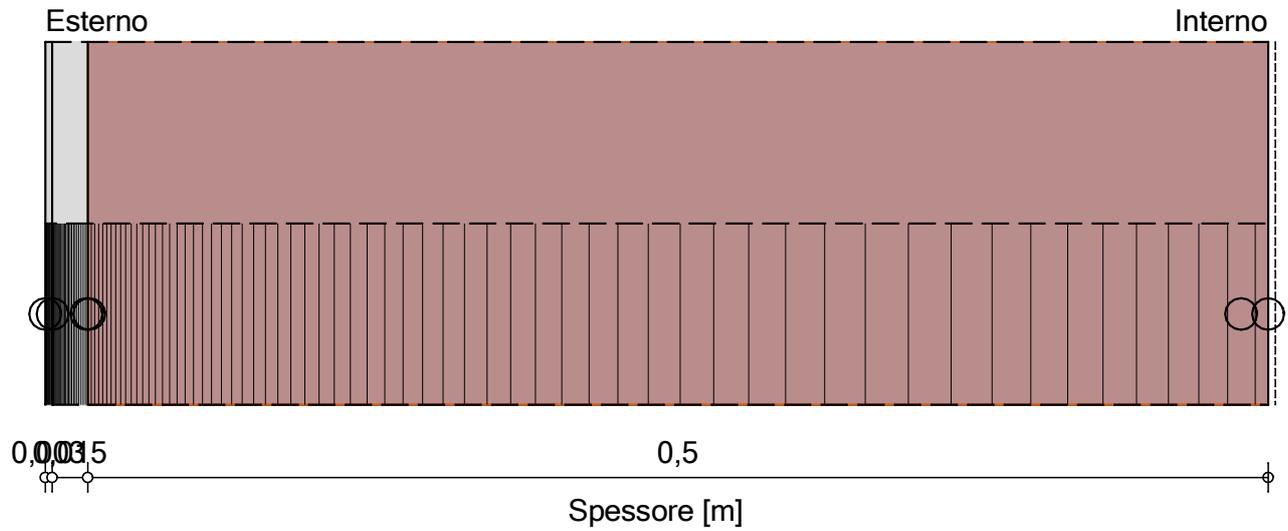


Materiale: *Strato d'aria

Proprietà	Unità	Valore
Densità apparente	[kg/m ³]	1,3
Porosità	[m ³ /m ³]	0,999
Capacità termica a secco	[J/(kg K)]	1000
Conducibilità termica a secco, 10°C	[W/(m K)]	1,38
Fattore di resistenza alla diffusione di vapore [-]	[-]	0,2

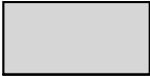


9.3. Stratigrafia mattoni



○ - Posizioni di controllo

Materiali:

	- Intonaco nobile al quarzo	0,003 m
	- Intonaco di armatura minerale	0,015 m
	- Mattone belga	0,5 m

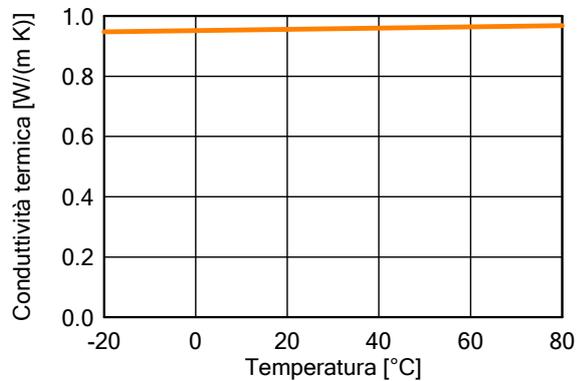
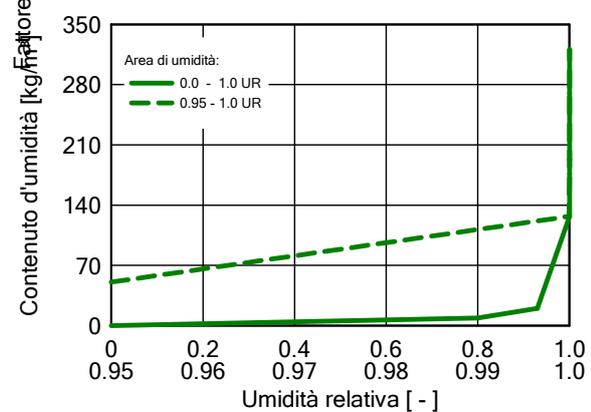
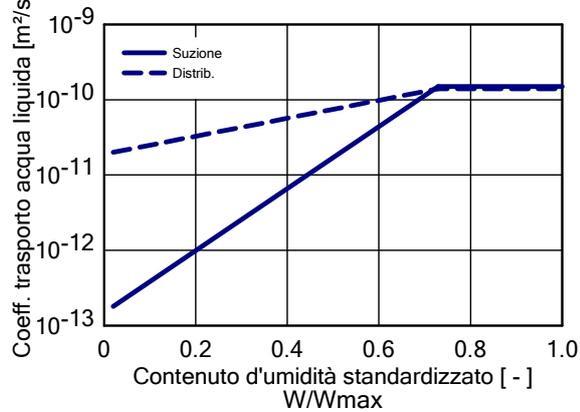
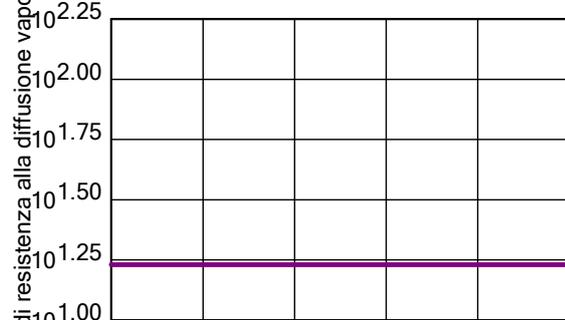
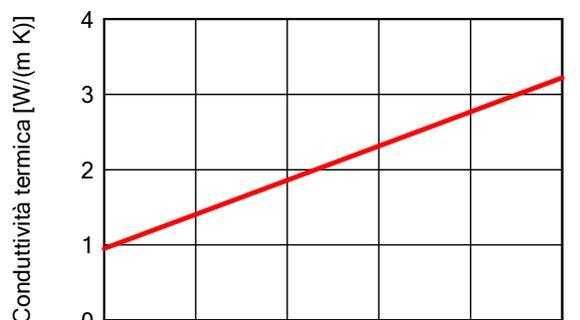
Spessore totale: 0,518 m

Resistenza termica: 0,73 [m² K/W]

Trasmittanza termica: 1,36 [W/m² K]

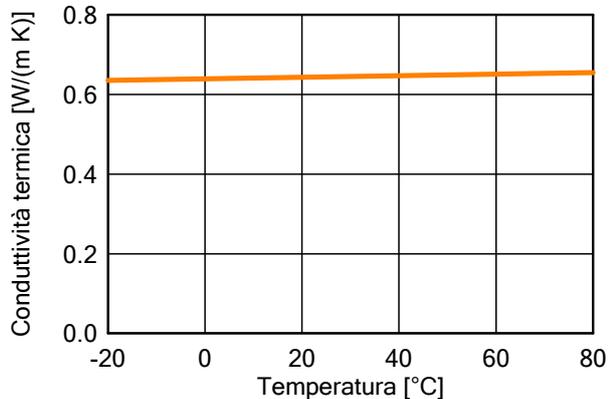
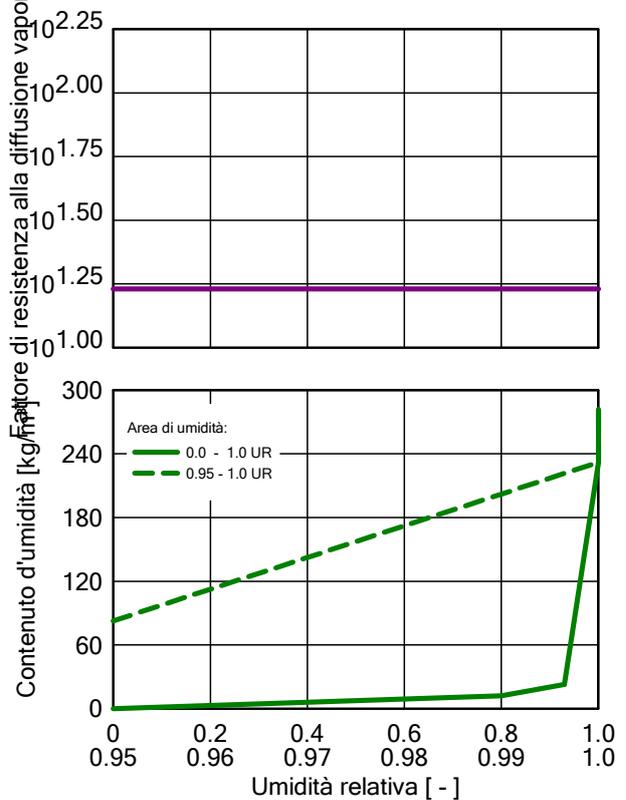
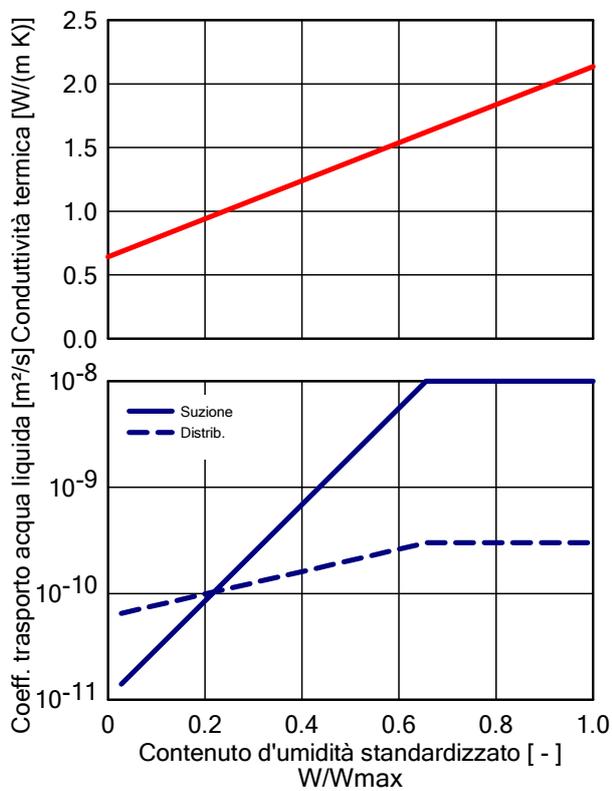
Materiale: Intonaco nobile al quarzo

Proprietà	Unità	Valore
Densità apparente	[kg/m ³]	1482
Porosità	[m ³ /m ³]	0.44
Capacità termica a secco	[J/(kg K)]	850
Conducibilità termica a secco, 10°C	[W/(m K)]	0.954
Fattore di resistenza alla diffusione di vapore	[-]	17
Contenuto d'umidità di riferimento	[kg/m ³]	8.9
Acqua di libera saturazione	[kg/m ³]	321
Coefficiente di assorbimento d'umidità	[kg/(m ² s ^{0.5})]	0.002
Supplemento alla conduttività termica, dip. umidità	[%/M.-%]	8
Supplemento conduttività termica, temp.	[W/(m K ²)]	2,00000E-4



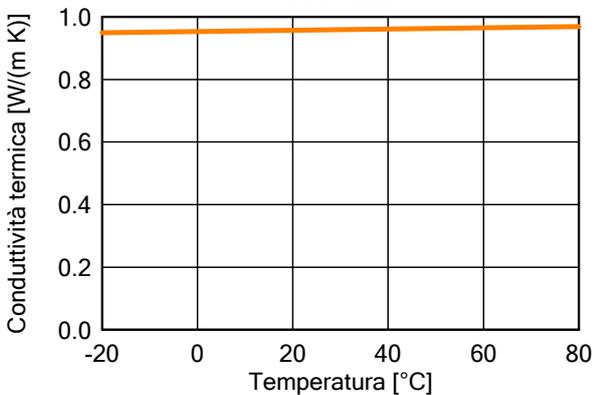
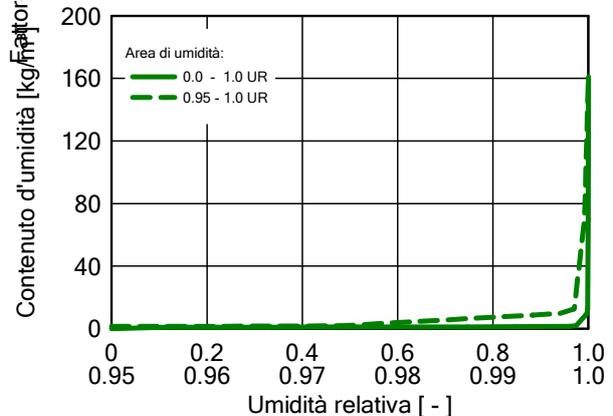
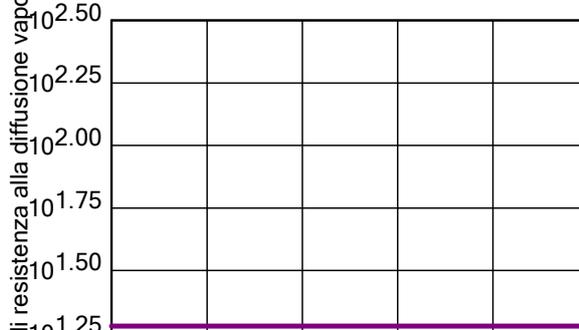
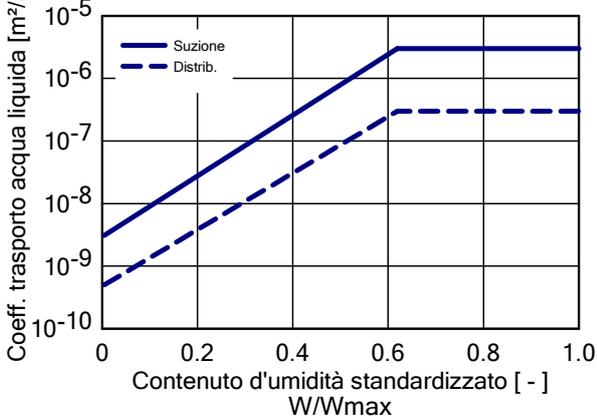
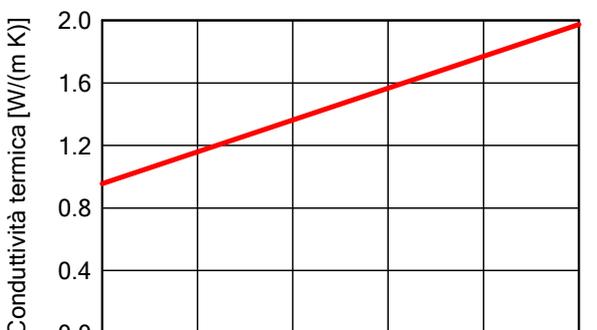
Materiale: Intonaco di armatura minerale

Proprietà	Unità	Valore
Densità apparente	[kg/m ³]	1475
Porosità	[m ³ /m ³]	0.43
Capacità termica a secco	[J/(kg K)]	850
Conducibilità termica a secco, 10°C	[W/(m K)]	0.641
Fattore di resistenza alla diffusione di vapore	[-]	17
Contenuto d'umidità di riferimento	[kg/m ³]	12
Acqua di libera saturazione	[kg/m ³]	282
Coefficiente di assorbimento d'umidità	[kg/(m ² s ^{0.5})]	0.015
Supplemento alla conducibilità termica, dip. umidità	[%/M.-%]	8
Supplemento conducibilità termica, temp.	[W/(m K ²)]	2,00000E-4



Materiale: Mattone belga

Proprietà	Unità	Valore
Densità apparente	[kg/m ³]	1952
Porosità	[m ³ /m ³]	0.26
Capacità termica a secco	[J/(kg K)]	863
Conducibilità termica a secco, 10°C	[W/(m K)]	0.955
Fattore di resistenza alla diffusione di vapore	[-]	19
Contenuto d'umidità di riferimento	[kg/m ³]	1.2
Acqua di libera saturazione	[kg/m ³]	161
Coefficiente di assorbimento d'umidità	[kg/(m ² s ^{0.5})]	0.142
Supplemento alla conducibilità termica, dip. umidità	[%/M.-%]	8
Supplemento conducibilità termica, temp.	[W/(m K ²)]	2,00000E-4



10. Risultati delle simulazioni

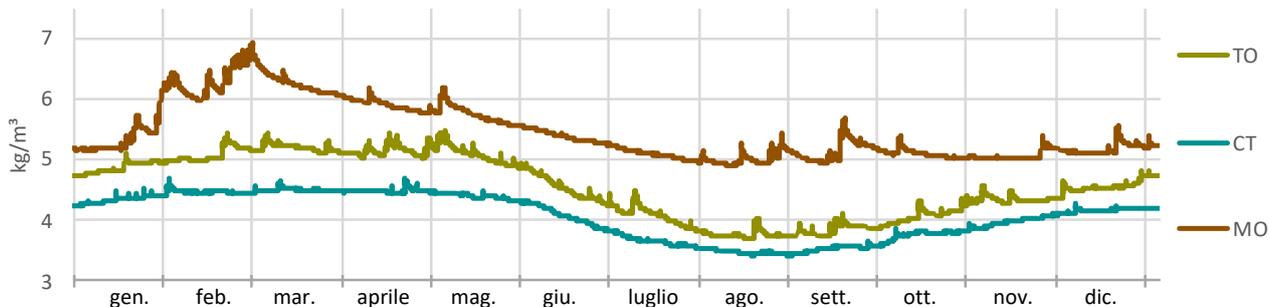
10.1. Cork001_granite



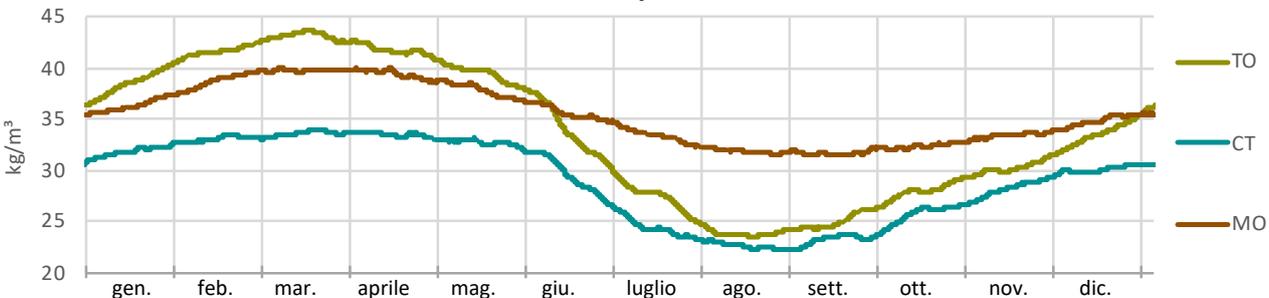
- Stratigrafia granite 0,31 m
- Cork001 0,06 m
- Intonaco al quarzo 0,015 m

Spessore totale: 0,385 m
 U_ISO6946: 1,02 W/m² K

Contenuto d'acqua nella parete



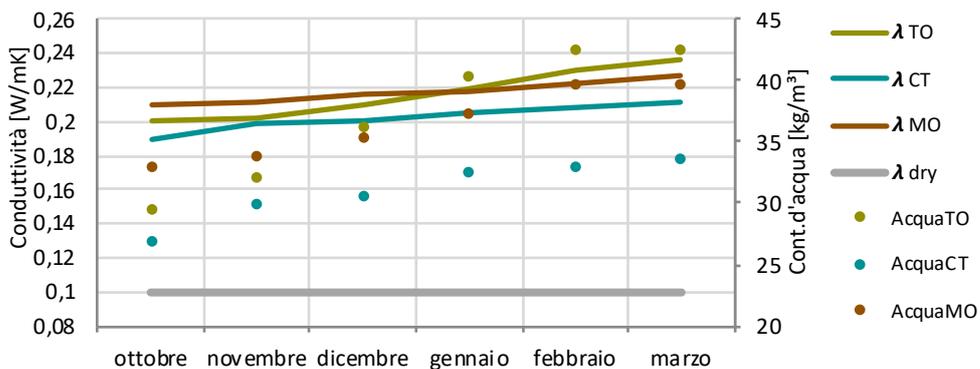
Contenuto d'acqua nell'isolante



Conducibilità termica e contenuto d'acqua nell'isolante

Conducibilità:
 incremento
 medio rispetto il
 valore a secco

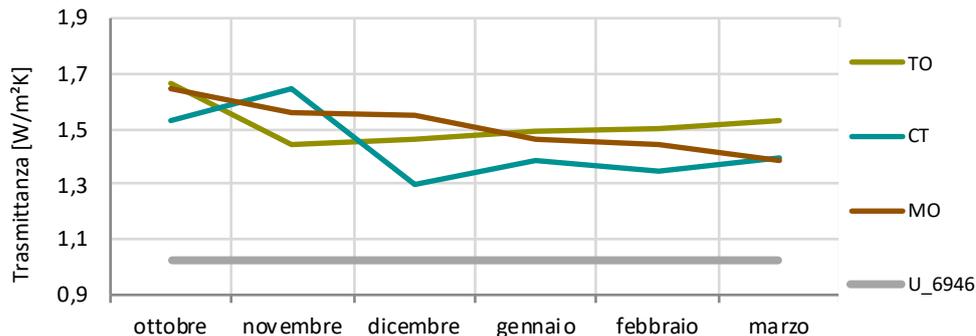
TO	116%
CT	102%
MO	117%



Trasmittanza:
 incremento
 medio rispetto
 la UNI 6946

TO	48%
CT	39%
MO	47%

Trasmittanza termica



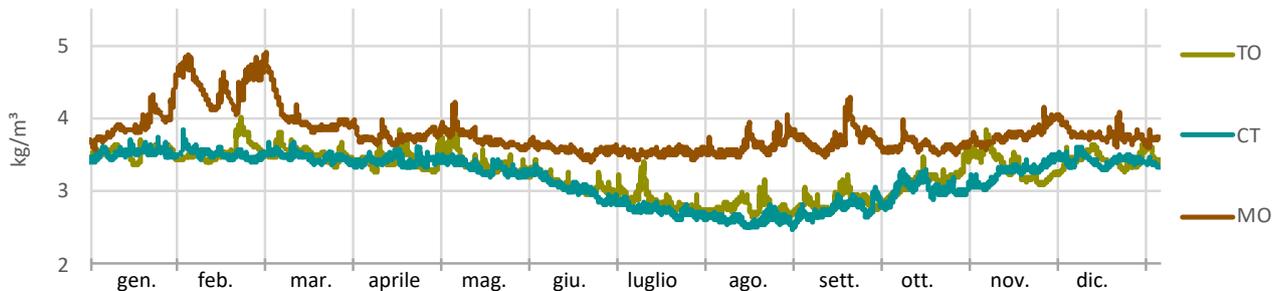
10.2. Cork001_intercapedine



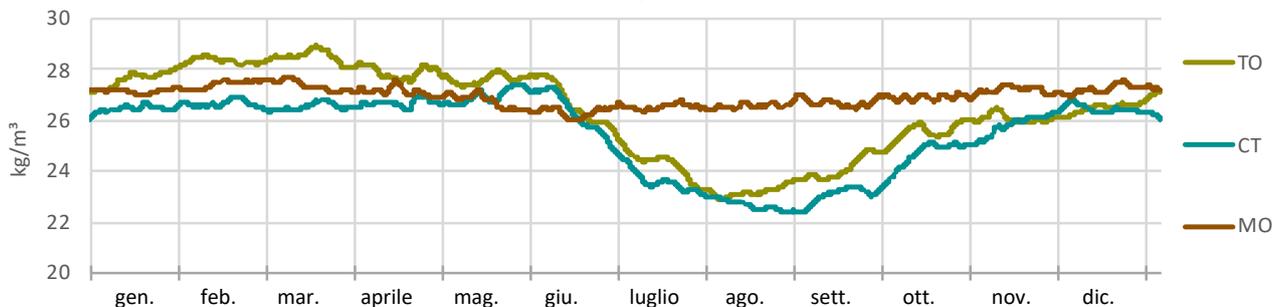
Stratigrafia intercap. 0,51 m
Cork001 0,06 m
Intonaco al quarzo 0,015 m

Spessore totale: 0,585 m
U_ISO6946: 0,83 W/m² K

Contenuto d'acqua nella parete



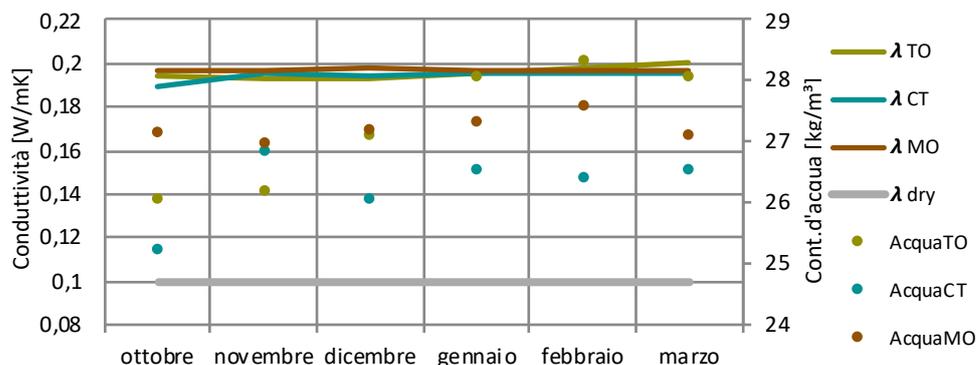
Contenuto d'acqua nell'intonaco



Conduttività termica e contenuto d'acqua nell'isolante

Conduttività:
incremento
medio rispetto
il valore a
secco

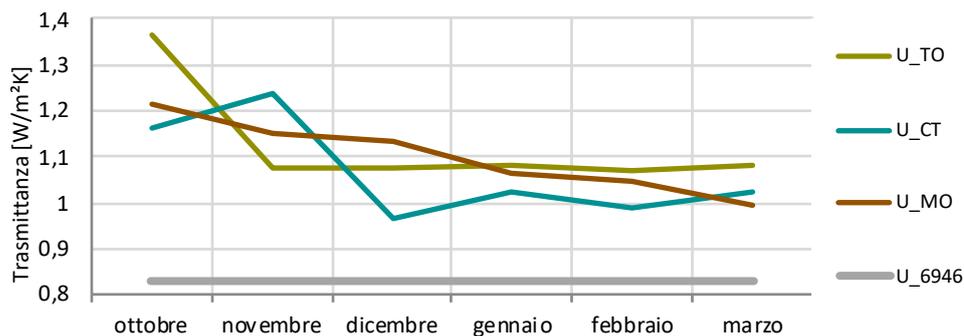
TO	96%
CT	94%
MO	97%



Trasmittanza termica

Trasmittanza:
incremento
medio rispetto
la UNI 6946

TO	35%
CT	28%
MO	32%

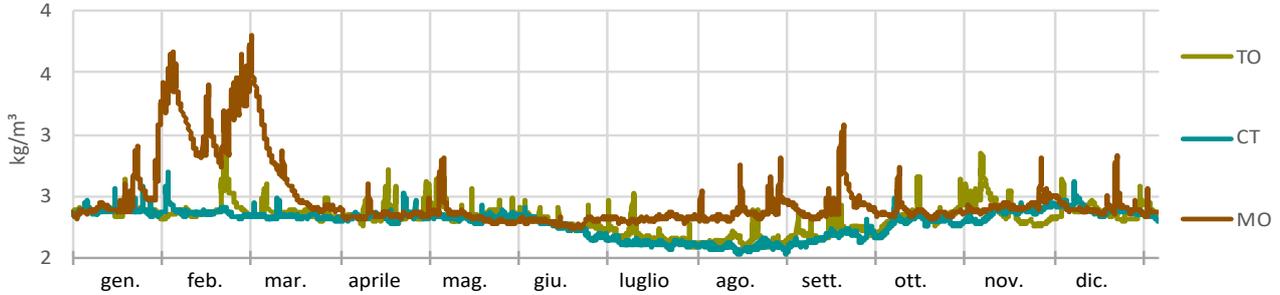


10.3. Cork001_mattoni

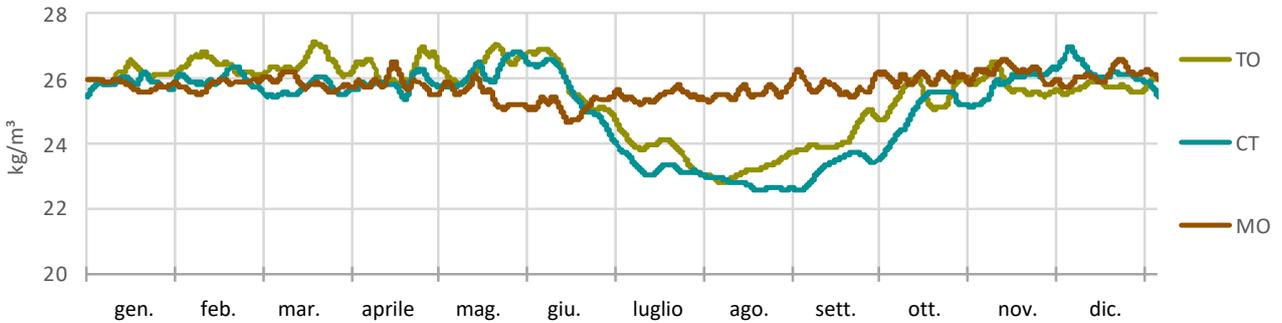


Spessore totale: 0,593 m
U_ISO6946: 0,74 W/m² K

Contenuto d'acqua nella parete



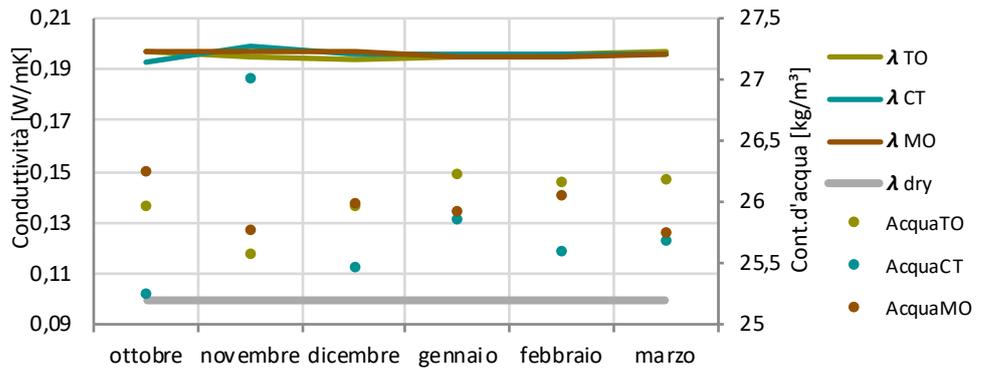
Contenuto d'acqua nell'intonaco



Conducibilità termica e contenuto d'acqua nell'isolante

Conducibilità:
incremento
medio rispetto
il valore a
secco

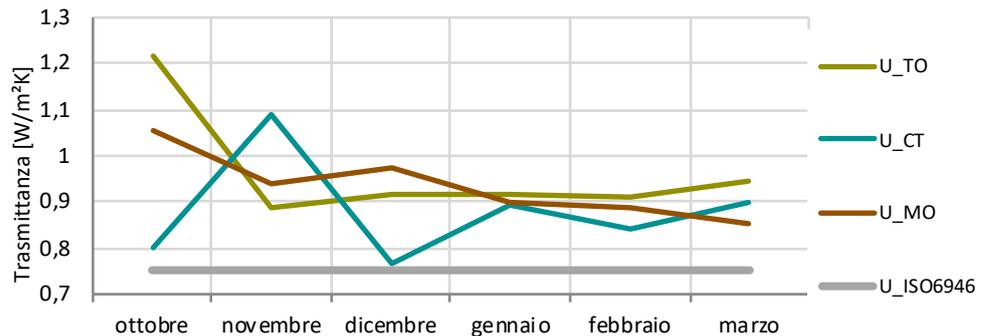
TO	96%
CT	96%
MO	96%



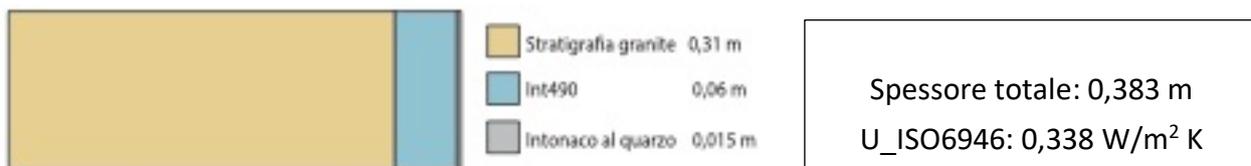
Trasmittanza termica

Trasmittanza:
incremento
medio rispetto
la UNI 6946

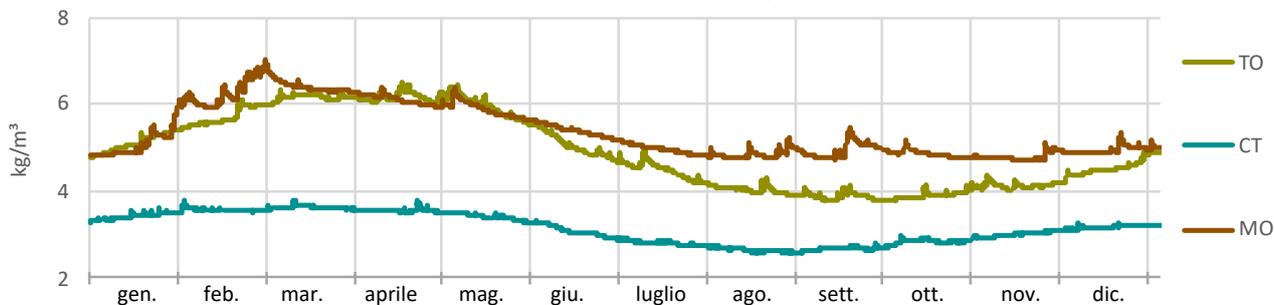
TO	29%
CT	18%
MO	25%



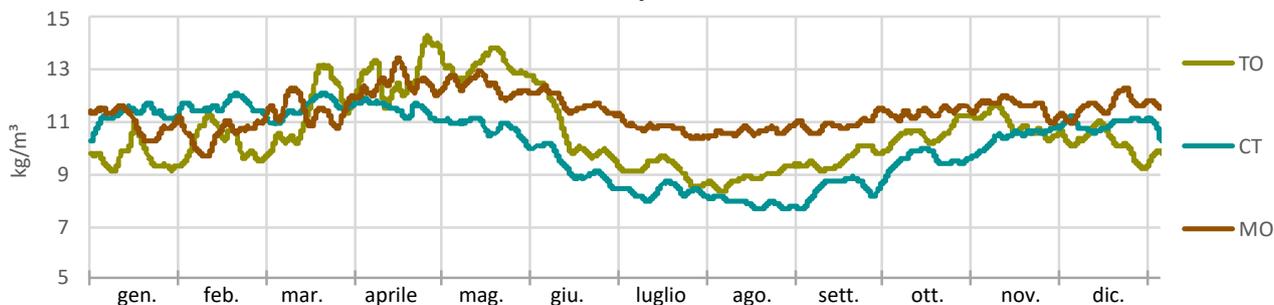
10.4. Int490_granite



Contenuto d'acqua nella parete



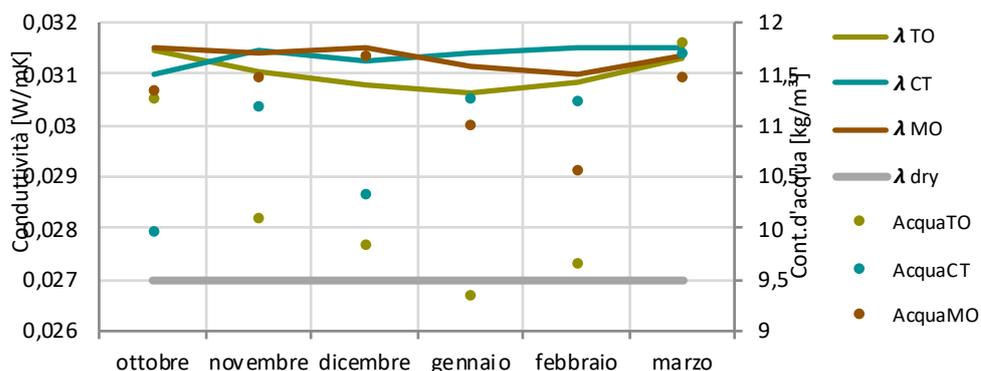
Contenuto d'acqua nell'intonaco



Conducibilità termica e contenuto d'acqua nell'isolante

Conducibilità:
incremento
medio rispetto
il valore a
secco

TO	15%
CT	15%
MO	15%



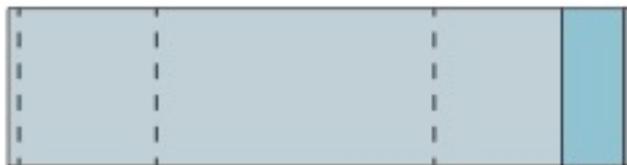
Trasmittanza termica

Trasmittanza:
incremento
medio rispetto
la UNI 6946

TO	12 %
CT	11%
MO	13%



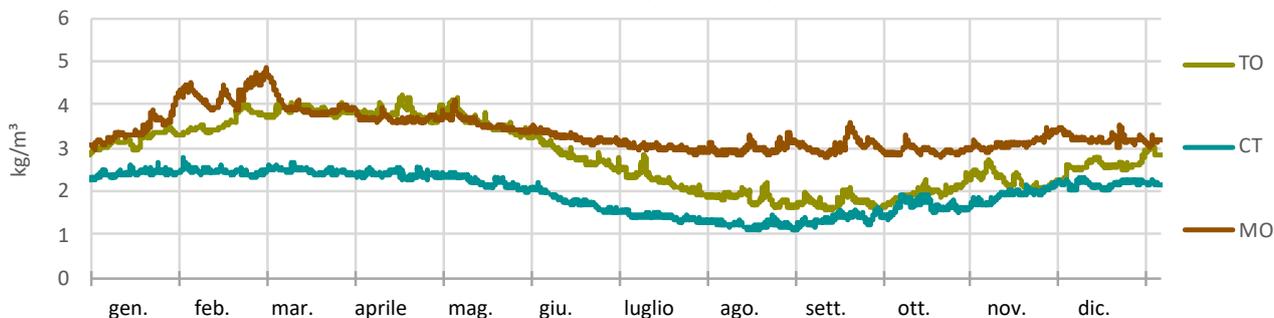
10.5. Int490_intercapedine



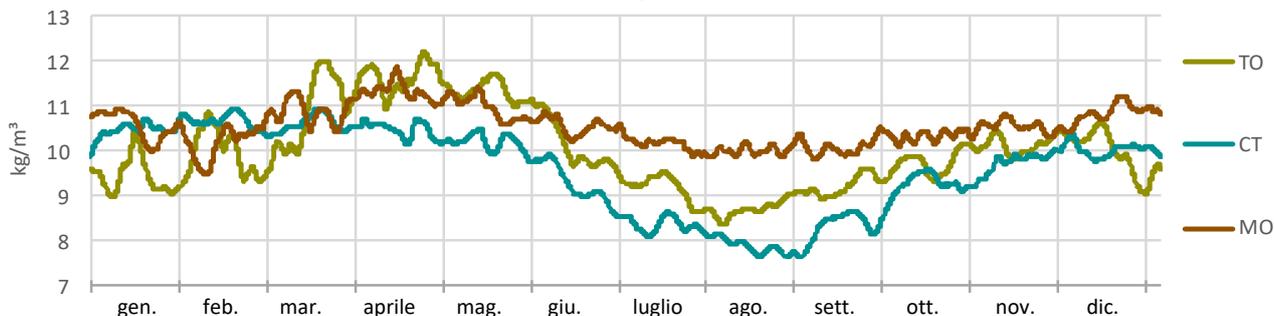
- Stratigrafia intercap. 0,51 m
- Int490 0,06 m
- Intonaco al quarzo 0,015 m

Spessore totale: 0,585 m
 $U_{ISO6946}$: 0,35 W/m² K

Contenuto d'acqua nella parete



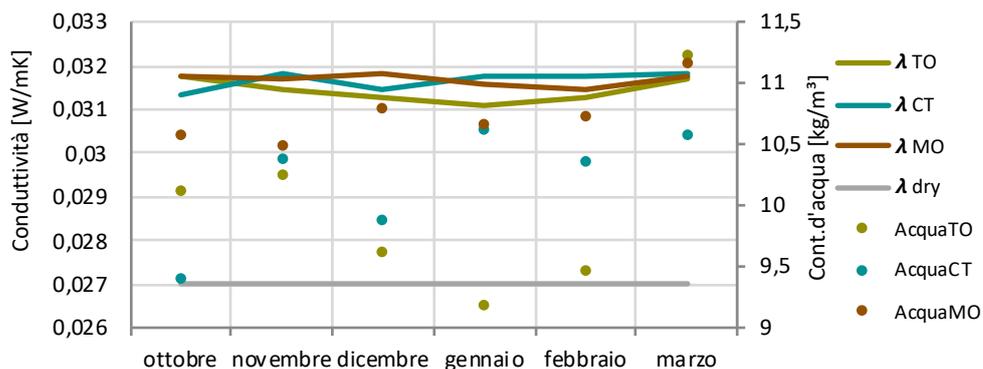
Contenuto d'acqua nell'intonaco



Conducibilità termica e contenuto d'acqua nell'isolante

Conducibilità:
 incremento
 medio rispetto
 il valore a
 secco

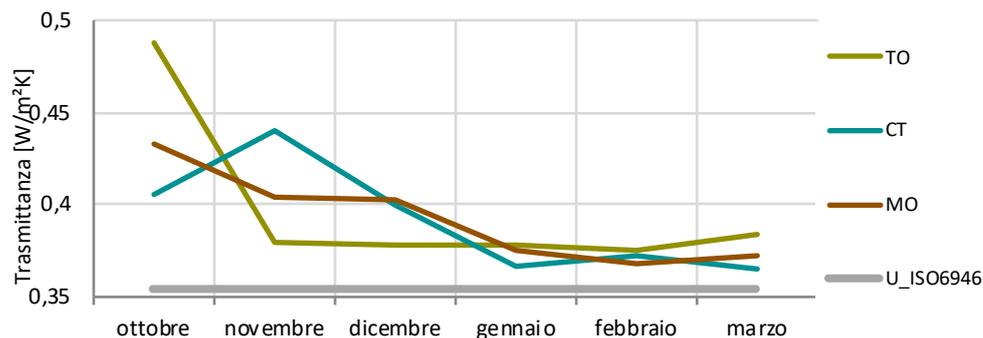
TO	15%
CT	15%
MO	19%



Trasmittanza:
 incremento
 medio rispetto
 la UNI 6946

TO	12%
CT	11%
MO	10%

Trasmittanza termica

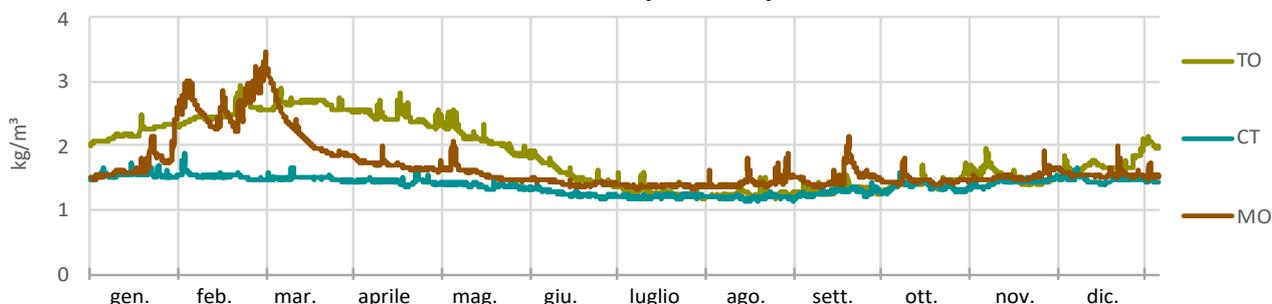


10.6. Int490_mattoni

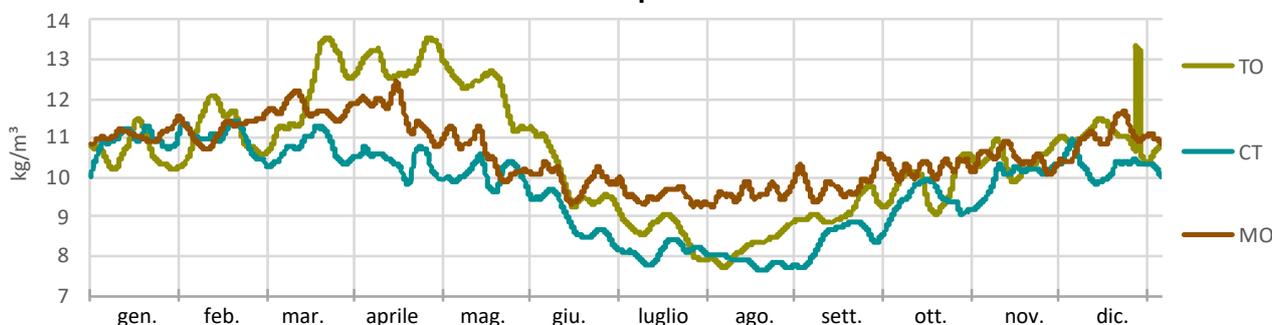


Spessore totale: 0,593 m
 $U_{ISO6946}$: 0,33 W/m² K

Contenuto d'acqua nella parete



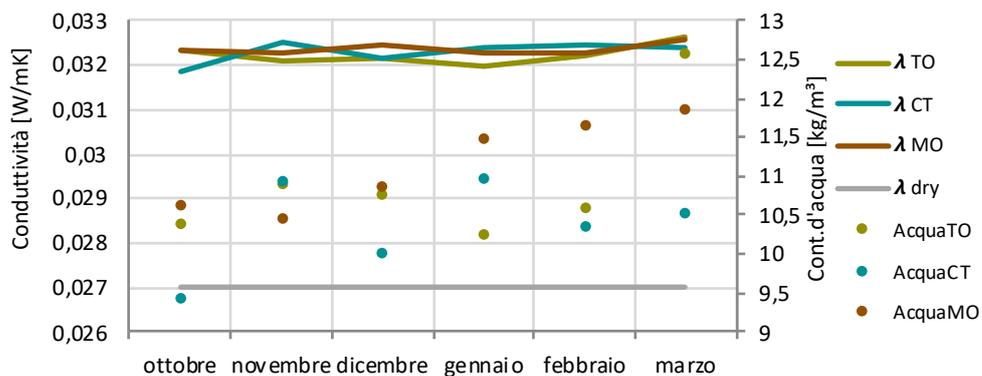
Contenuto d'acqua nell'intonaco



Conducibilità termica e contenuto d'acqua nell'isolante

Conducibilità:
 incremento
 medio rispetto
 il valore a
 secco

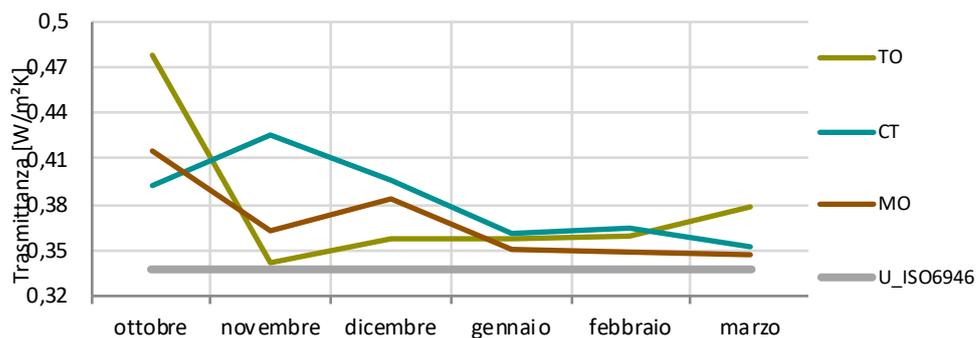
TO	19%
CT	19%
MO	19%



Trasmittanza termica

Trasmittanza:
 incremento
 medio rispetto
 la UNI 6946

TO	14 %
CT	13%
MO	9%



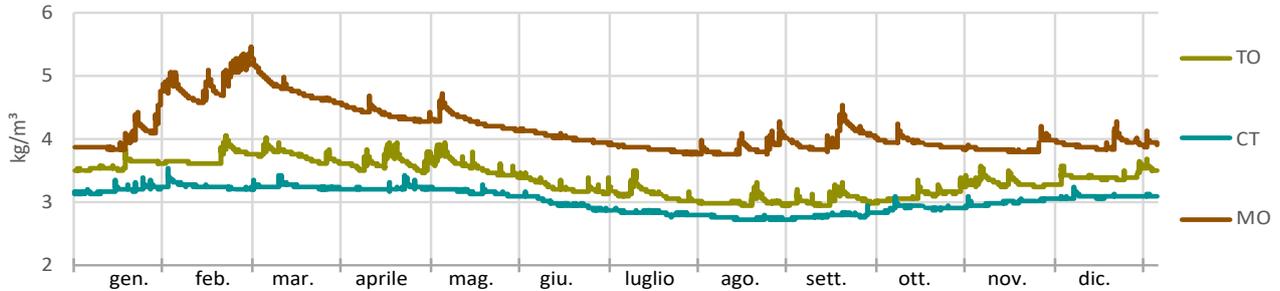
10.7. PCM26_granite



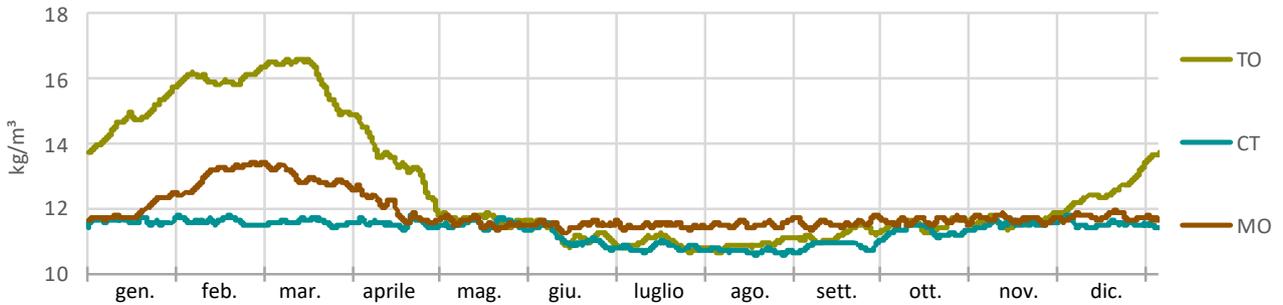
- Stratigrafia granite 0,31 m
- PCM26 0,06 m
- Intonaco al quarzo 0,015 m

Spessore totale: 0,383 m
U_ISO6946: 1,08 W/m² K

Contenuto d'acqua nella parete



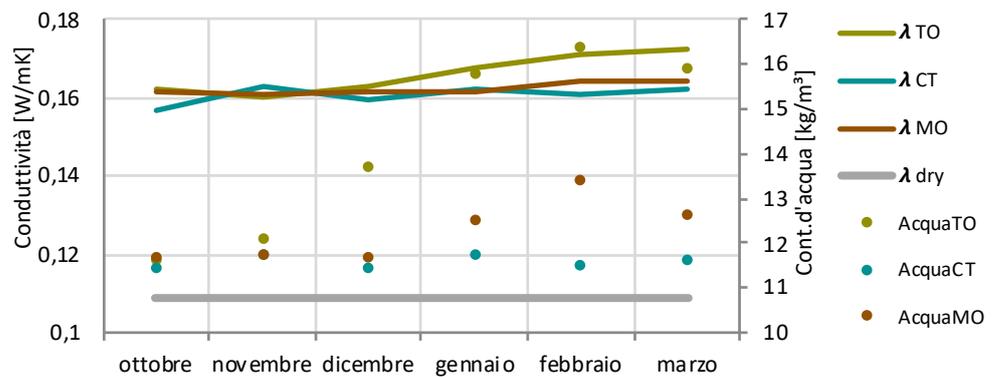
Contenuto d'acqua nell'intonaco



Conducibilità termica e contenuto d'acqua nell'isolante

Conducibilità:
incremento
medio rispetto
il valore a
secco

TO	52%
CT	48%
MO	49%



Trasmittanza termica

Trasmittanza:
incremento
medio rispetto
la UNI 6946

TO	24%
CT	22%
MO	20%

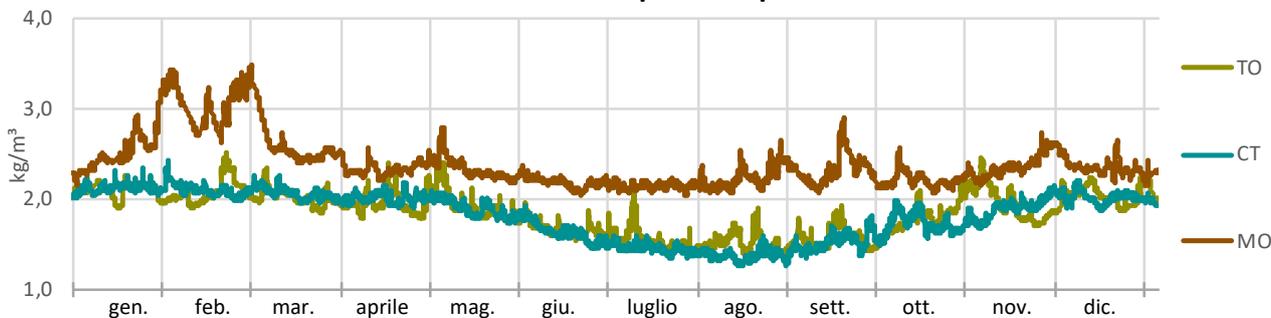


10.8. PCM26_intercapedine

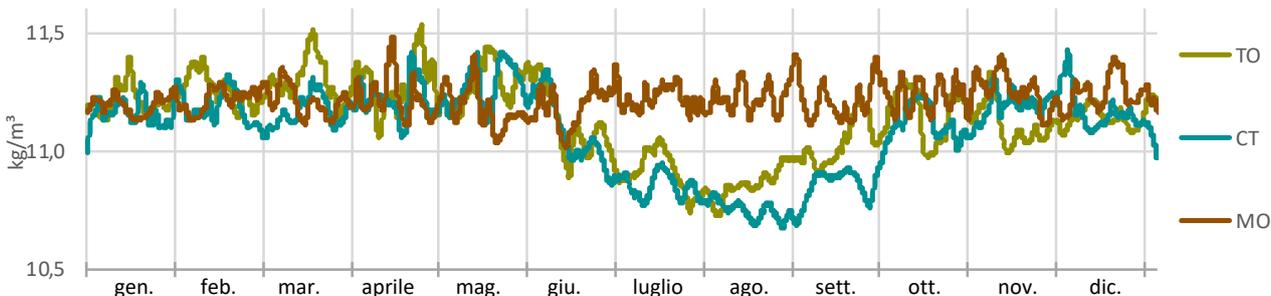


Spessore totale: 0,585 m
 U_ISO6946: 0,86 W/m² K

Contenuto d'acqua nella parete



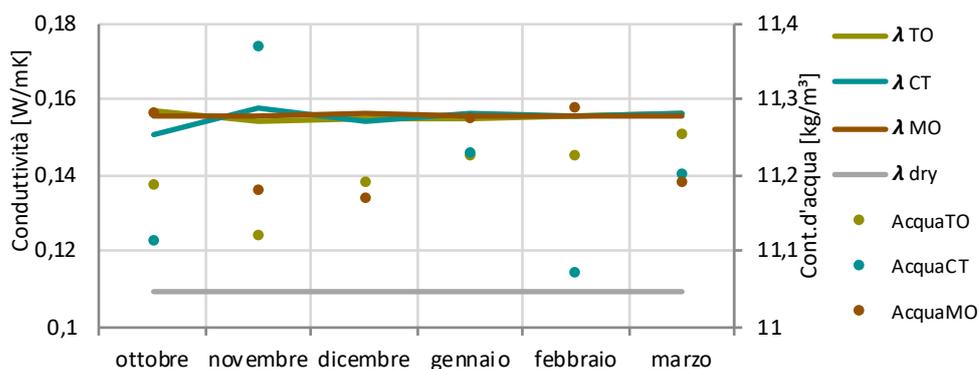
Contenuto d'acqua nell'intonaco



Conducibilità termica e contenuto d'acqua nell'isolante

Conducibilità:
 incremento
 medio rispetto
 il valore a
 secco

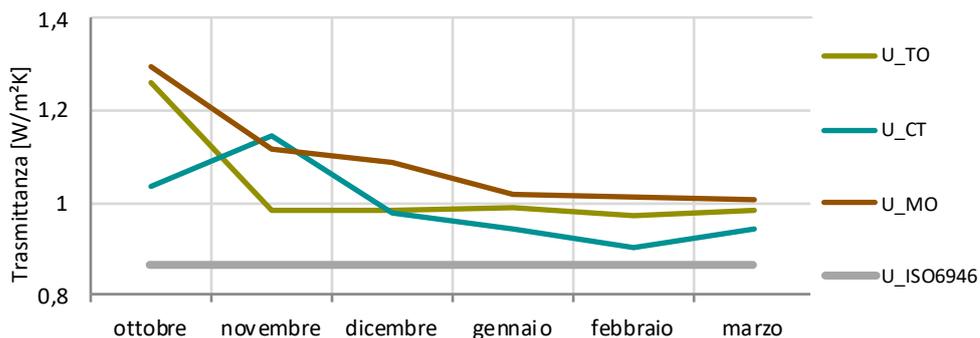
TO	42%
CT	42%
MO	43%



Trasmittanza termica

Trasmittanza:
 incremento
 medio rispetto
 la UNI 6946

TO	19%
CT	14 %
MO	25%

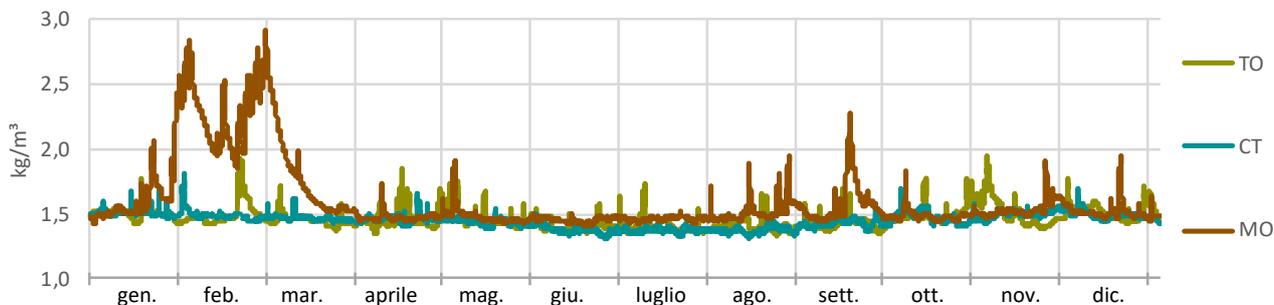


10.9. PCM26_mattoni

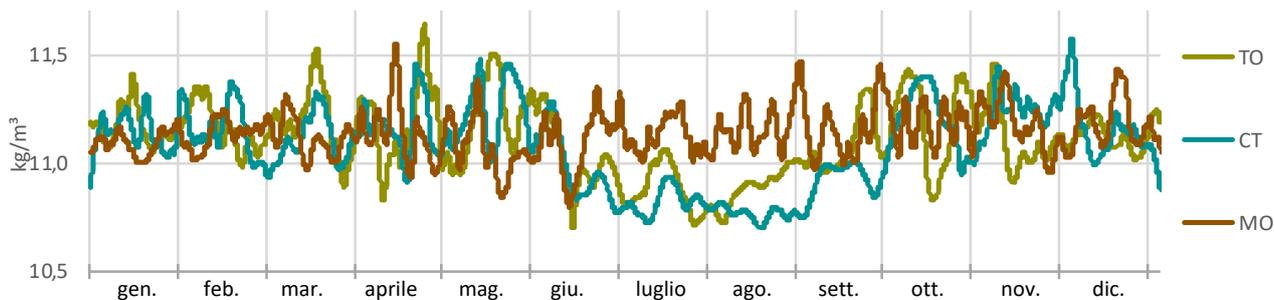


Spessore totale: 0,593 m
 U_ISO6946: 0,77 W/m² K

Contenuto d'acqua nella parete



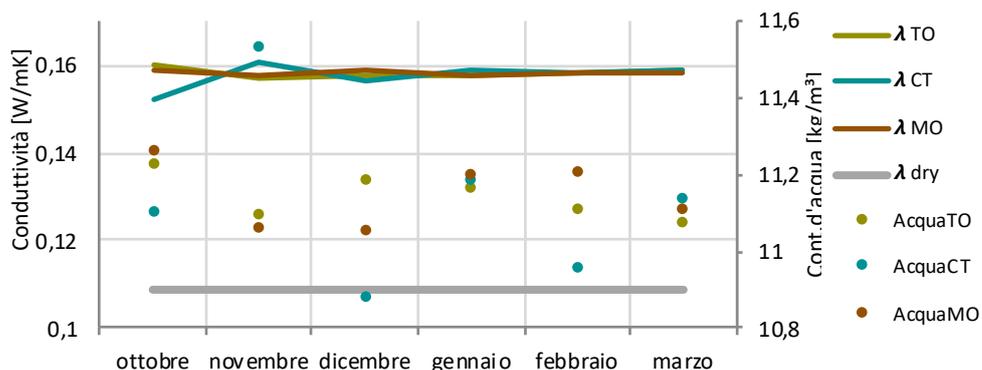
Contenuto d'acqua nell'intonaco



Conducibilità termica e contenuto d'acqua nell'isolante

Conducibilità:
 incremento
 medio rispetto
 il valore a
 secco

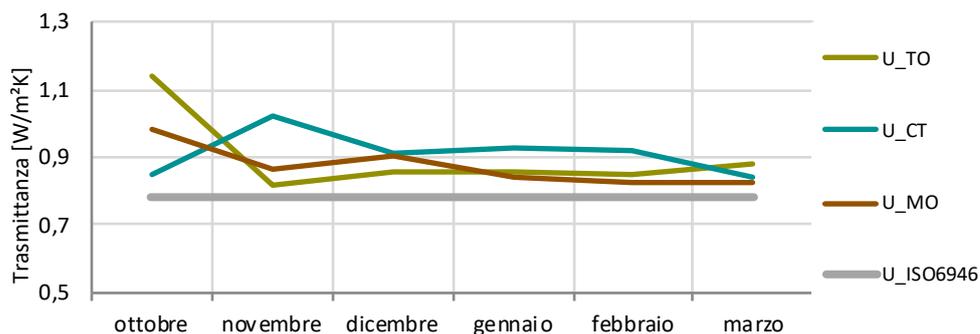
TO	45%
CT	45%
MO	45%



Trasmittanza termica

Trasmittanza:
 incremento
 medio rispetto
 la UNI 6946

TO	16%
CT	17%
MO	12%



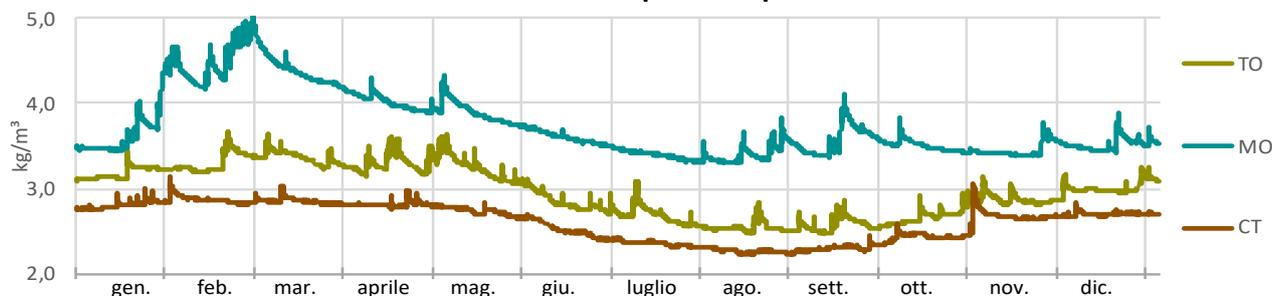
10.10. ThermoCalce_granite



- Stratigrafia granite 0,31 m
- ThermoCalce 0,06 m
- Intonaco al quarzo 0,015 m

Spessore totale: 0,383 m
 U_ISO6946: 1,26 W/m² K

Contenuto d'acqua nella parete



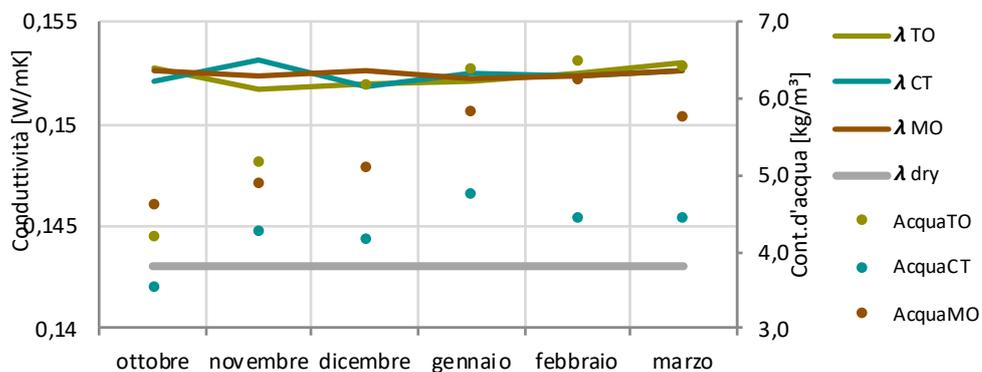
Contenuto d'acqua nell'intonaco



Conducibilità termica e contenuto d'acqua nell'isolante

Conducibilità:
 incremento
 medio rispetto
 il valore a
 secco

TO	6,1%
CT	6,2%
MO	7 %



Trasmittanza termica

Trasmittanza:
 incremento
 medio rispetto
 la UNI 6946

TO	10%
CT	7 %
MO	6%



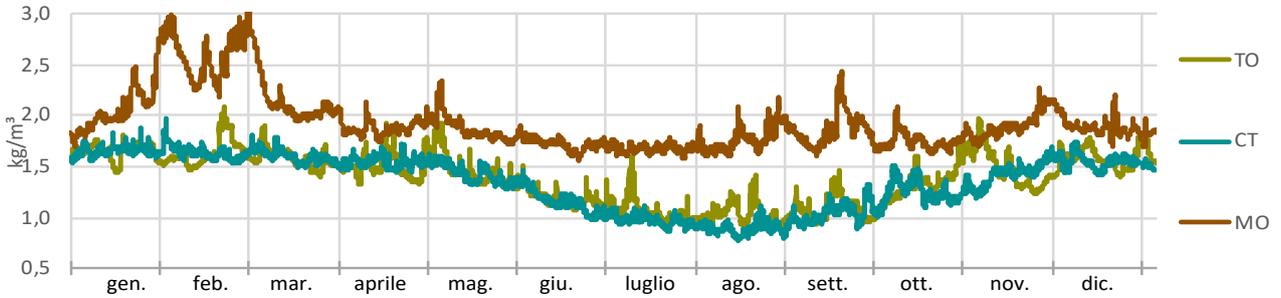
10.11. ThermoCalce_intercapedine



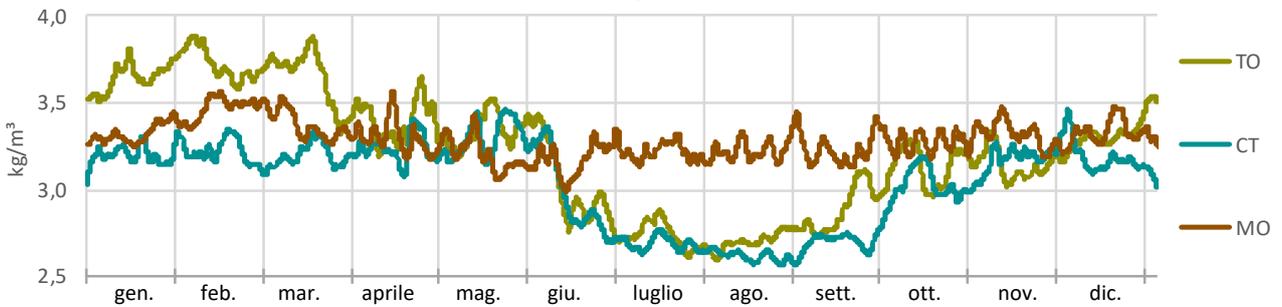
- Stratigrafia intercap. 0,51 m
- ThermoCalce 0,06 m
- Intonaco al quarzo 0,015 m

Spessore totale: 0,585 m
 U_ISO6946: 0,97 W/m² K

Contenuto d'acqua nella parete



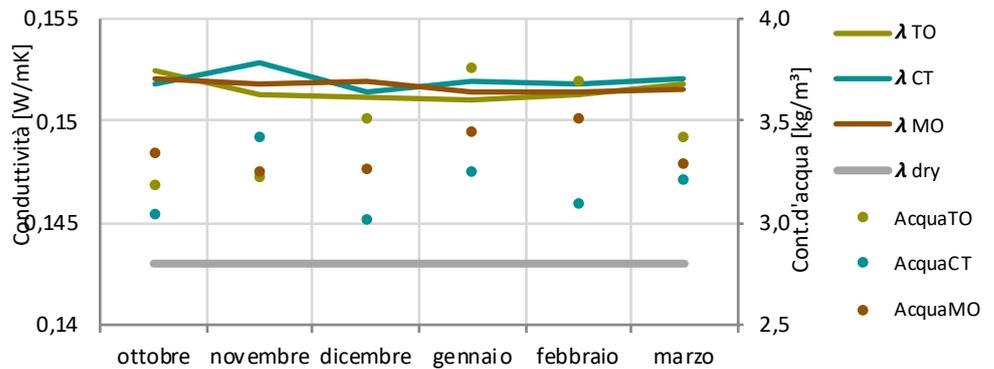
Contenuto d'acqua nell'intonaco



Conducibilità termica e contenuto d'acqua nell'isolante

Conducibilità:
 incremento
 medio rispetto
 il valore a
 secco

TO	6%
CT	5,9%
MO	5,7%



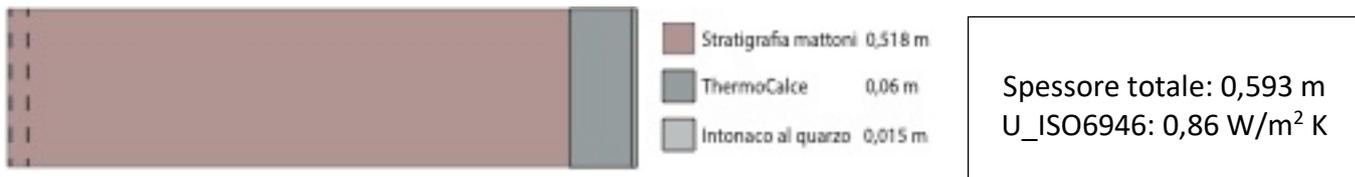
Trasmittanza termica

Trasmittanza:
 incremento
 medio rispetto
 la UNI 6946

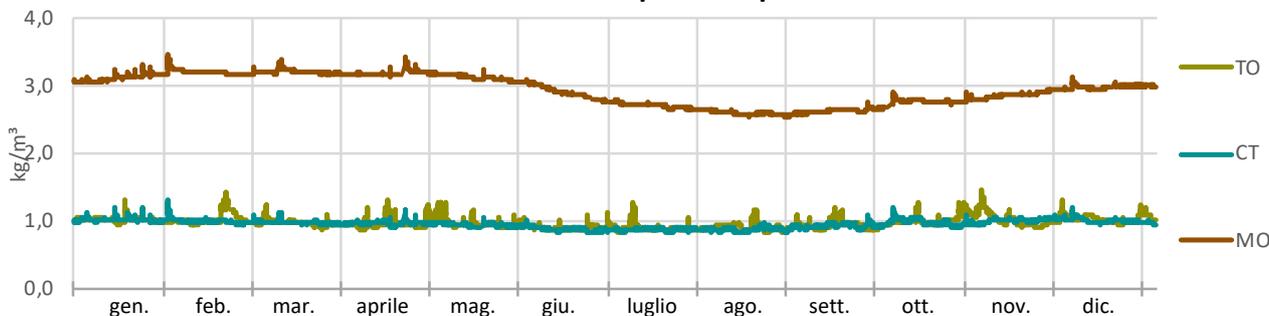
TO	13%
CT	8%
MO	7%



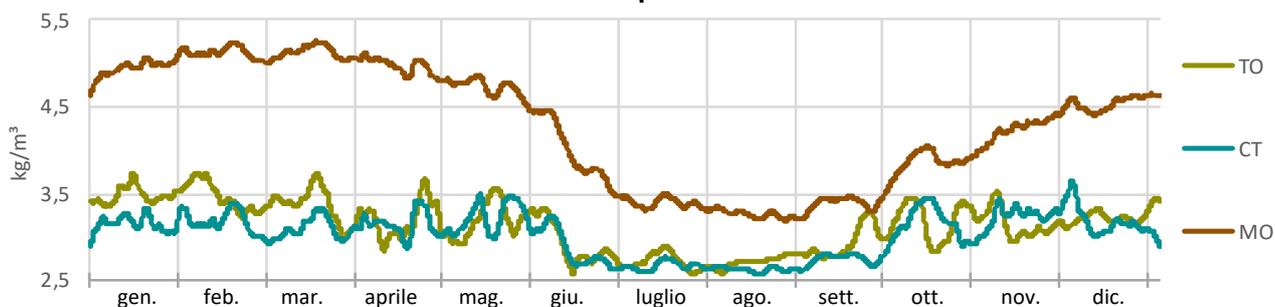
10.12. ThermoCalce_mattoni



Contenuto d'acqua nella parete



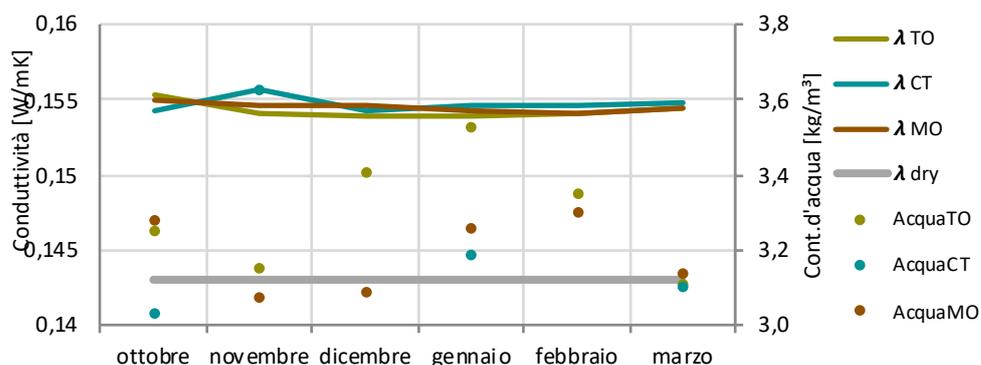
Contenuto d'acqua nell'intonaco



Conducibilità termica e contenuto d'acqua nell'isolante

Conducibilità:
incremento
medio rispetto
il valore a
secco

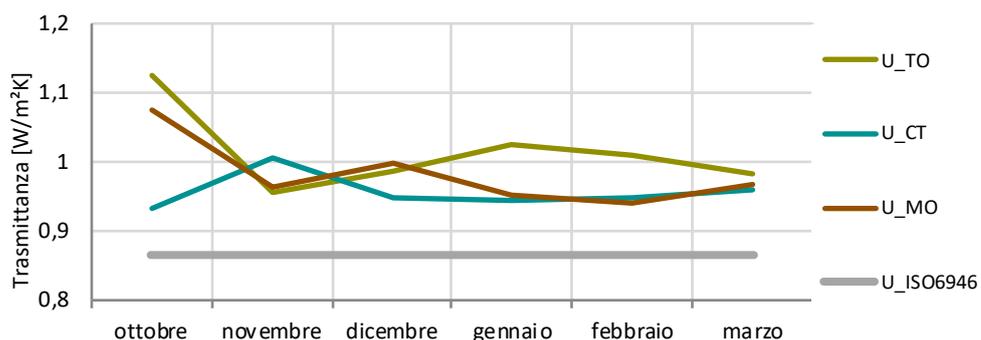
TO	8 %
CT	8%
MO	8%



Trasmittanza termica

Trasmittanza:
incremento
medio rispetto
la UNI 6946

TO	17%
CT	10%
MO	13%



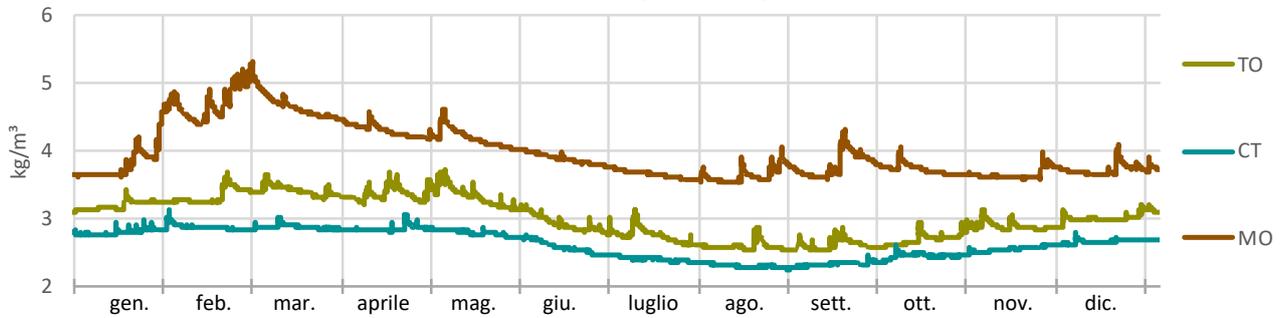
10.13. ThermoCalce014_granite



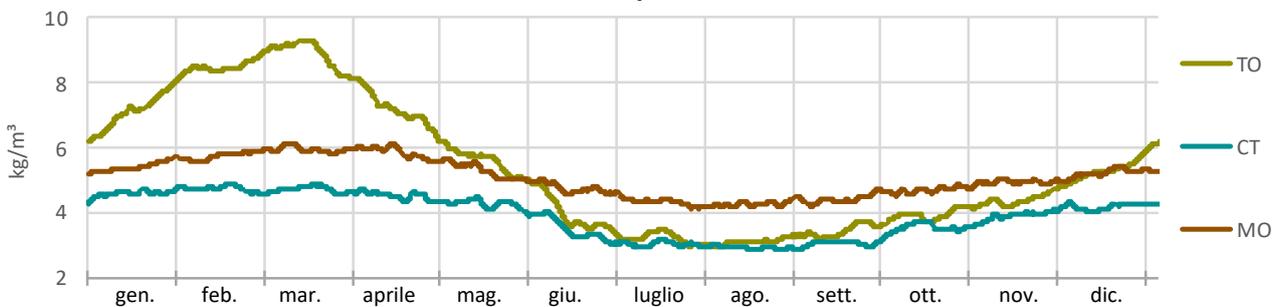
- Stratigrafia granite 0,31 m
- ThermoCalce014 0,06 m
- Intonaco al quarzo 0,015 m

Spessore totale: 0,383 m
 U_ISO6946: 0,91 W/m² K

Contenuto d'acqua nella parete



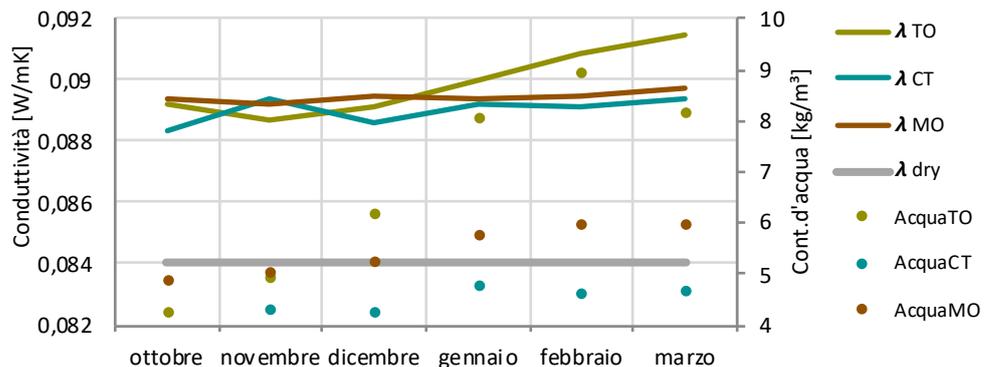
Contenuto d'acqua nell'intonaco



Conducibilità termica e contenuto d'acqua nell'isolante

Conducibilità:
 incremento
 medio rispetto
 il valore a
 secco

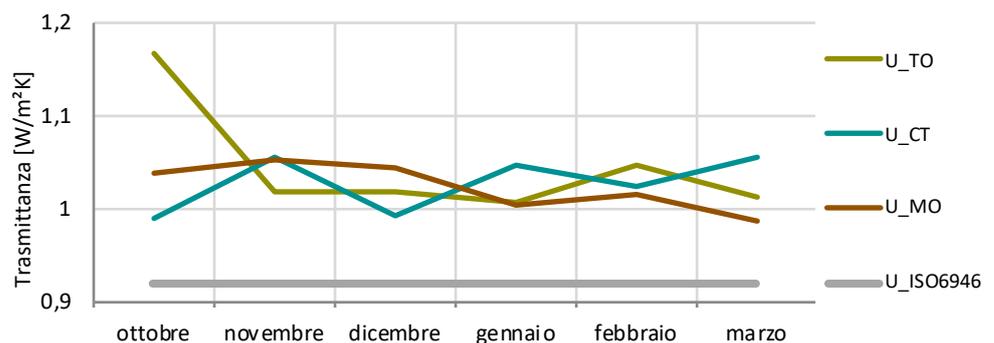
TO	7%
CT	6%
MO	7%



Trasmittanza termica

Trasmittanza:
 incremento
 medio rispetto
 la UNI 6946

TO	14 %
CT	12%
MO	11,3%



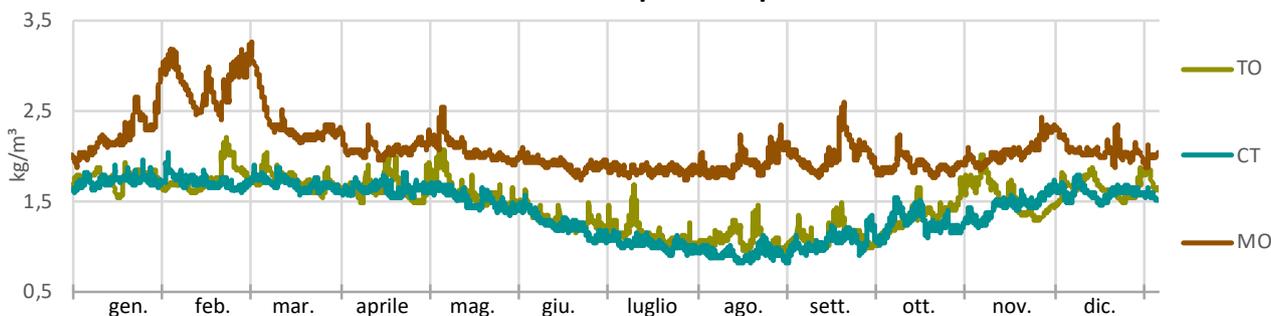
10.14. ThermoCalce014_intercapedine



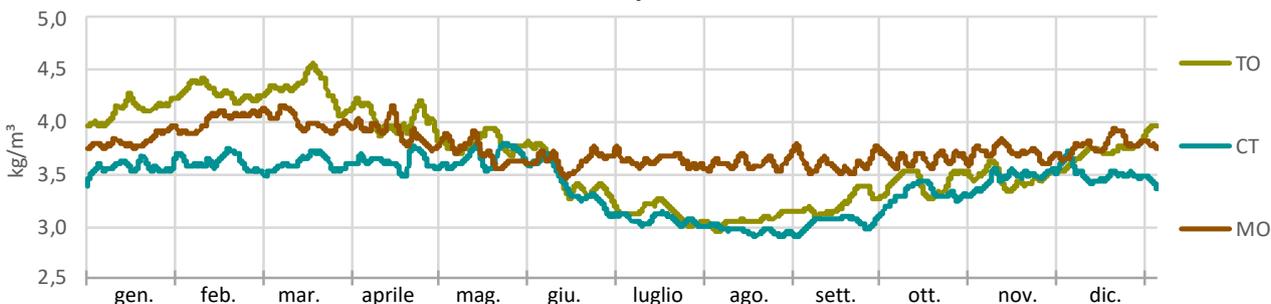
Stratigrafia intercap. 0,51 m
 ThermoCalce014 0,06 m
 Intonaco al quarzo 0,015 m

Spessore totale: 0,585 m
 U_ISO6946: 0,76 W/m² K

Contenuto d'acqua nella parete



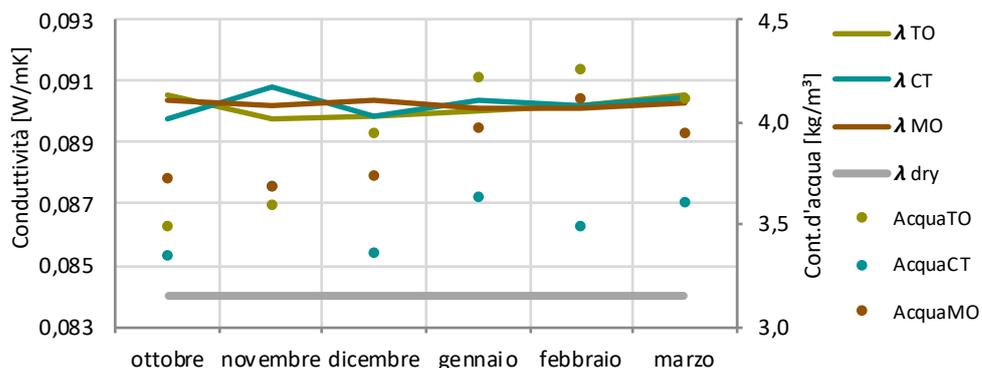
Contenuto d'acqua nell'intonaco



Conducibilità termica e contenuto d'acqua nell'isolante

Conducibilità:
 incremento
 medio rispetto
 il valore a
 secco

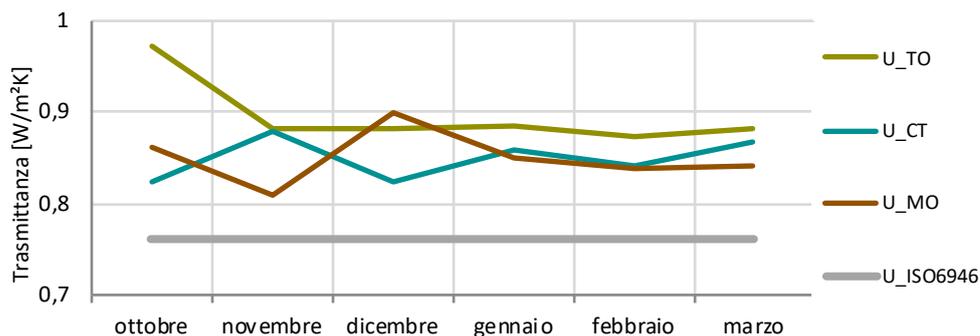
TO	6,9%
CT	6,9%
MO	6,9%



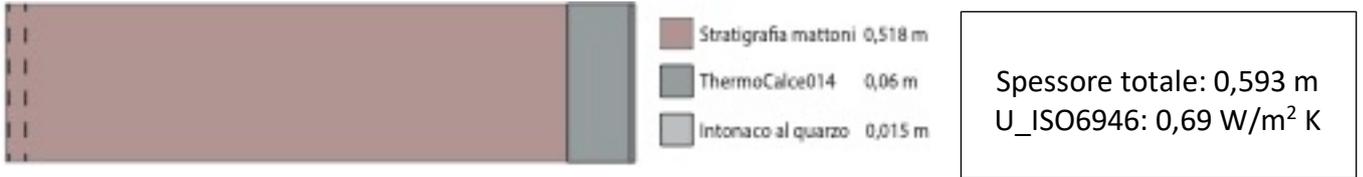
Trasmittanza termica

Trasmittanza:
 incremento
 medio rispetto
 la UNI 6946

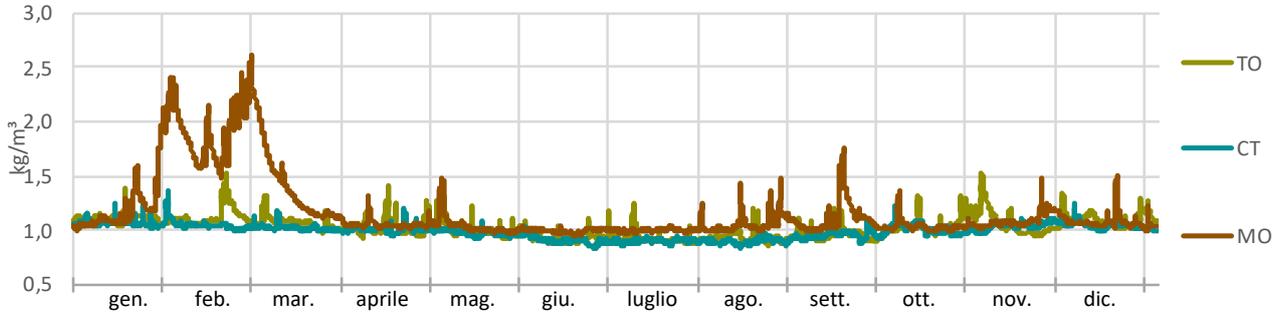
TO	18%
CT	12%
MO	12%



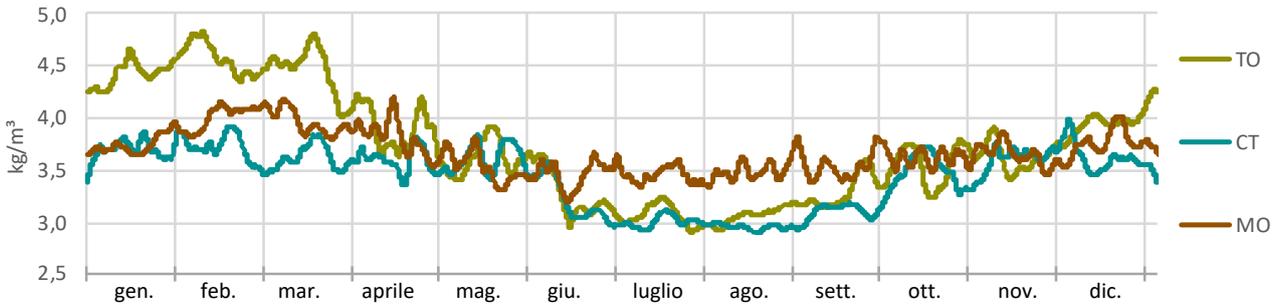
10.15. ThermoCalce014_mattoni



Contenuto d'acqua nella parete



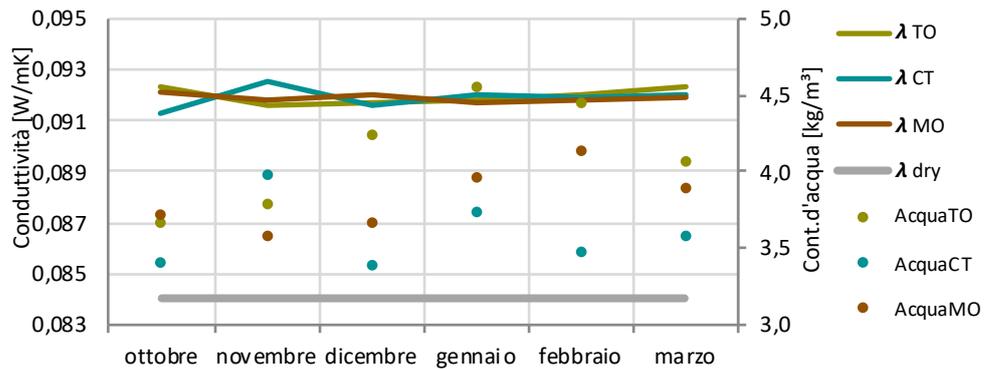
Contenuto d'acqua nell'intonaco



Conducibilità termica e contenuto d'acqua nell'isolante

Conducibilità:
 incremento
 medio rispetto
 il valore a
 secco

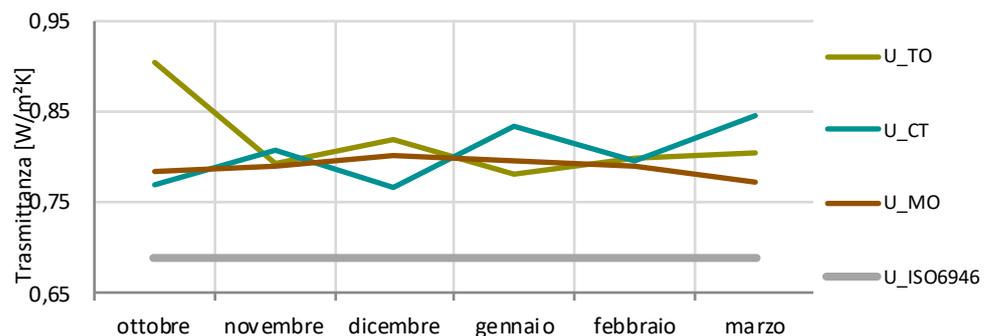
TO	10 %
CT	10 %
MO	10 %



Trasmittanza:
 incremento
 medio rispetto
 la UNI 6946

TO	18 %
CT	16 %
MO	14 %

Trasmittanza termica



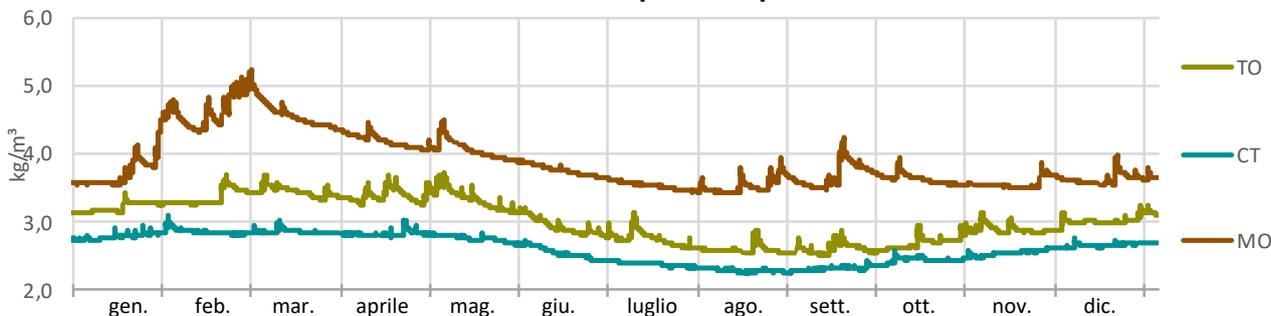
10.16. Thermintonaco_granite



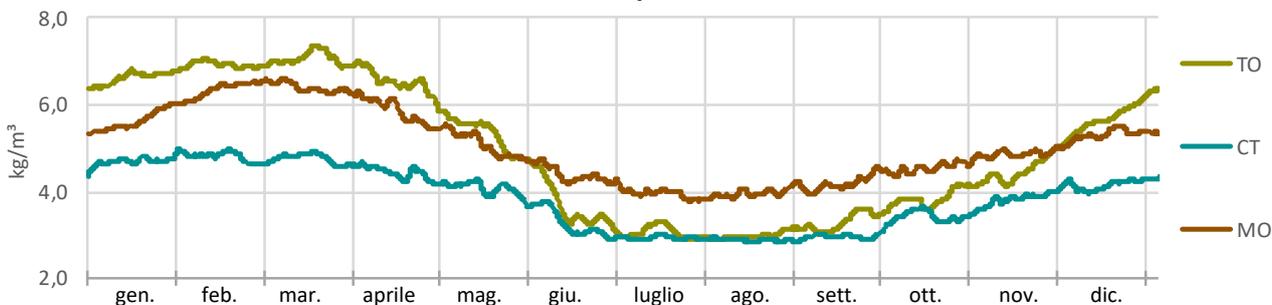
- Stratigrafia granite 0,31 m
- Thermintonaco 0,06 m
- Intonaco al quarzo 0,015 m

Spessore totale: 0,383 m
 U_ISO6946: 0,92 W/m² K

Contenuto d'acqua nella parete



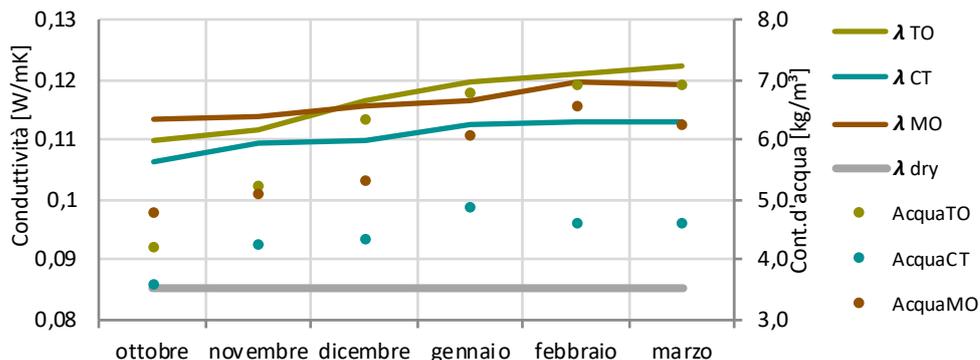
Contenuto d'acqua nell'intonaco



Conducibilità termica e contenuto d'acqua nell'isolante

Conducibilità:
 incremento
 medio rispetto
 il valore a
 secco

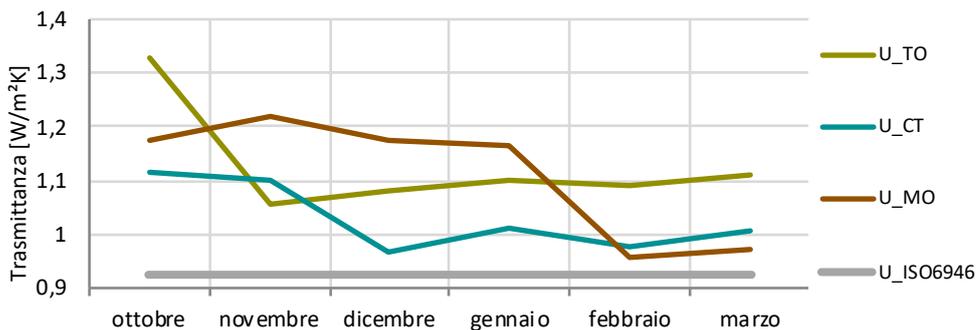
TO	38%
CT	,31%
MO	36%



Trasmittanza termica

Trasmittanza:
 incremento
 medio rispetto
 la UNI 6946

TO	22%
CT	13%
MO	20%



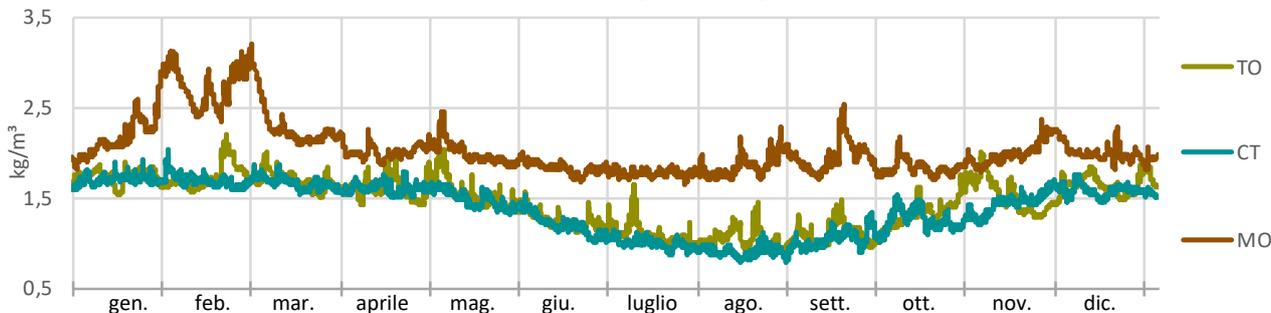
10.17. Thermintonaco_intercapedine



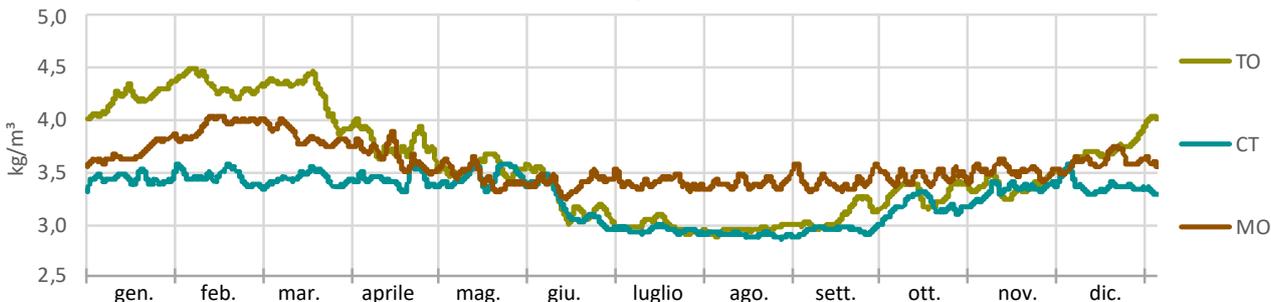
- Stratigrafia intercap. 0,51 m
- Thermintonaco 0,06 m
- Intonaco al quarzo 0,015 m

Spessore totale: 0,585 m
 $U_{ISO6946}$: 0,76 W/m² K

Contenuto d'acqua nella parete



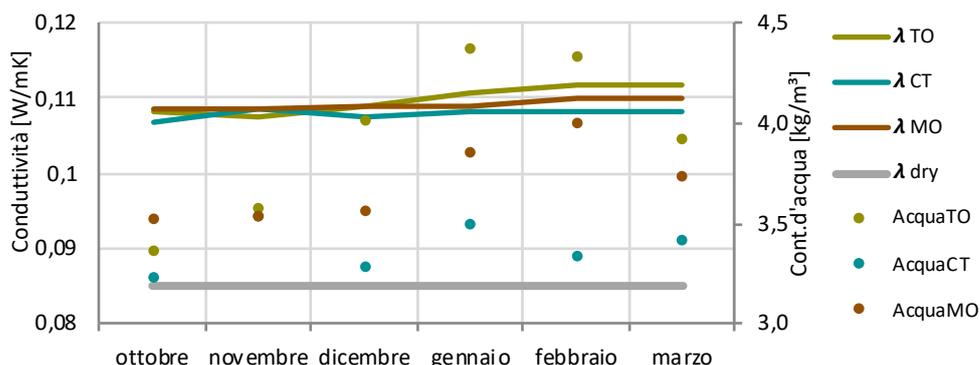
Contenuto d'acqua nell'intonaco



Conducibilità termica e contenuto d'acqua nell'isolante

Conducibilità:
 incremento
 medio rispetto
 il valore a
 secco

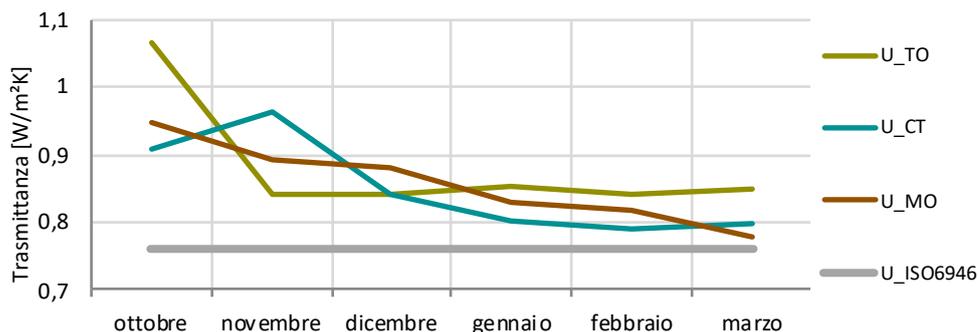
TO	29%
CT	27%
MO	28%



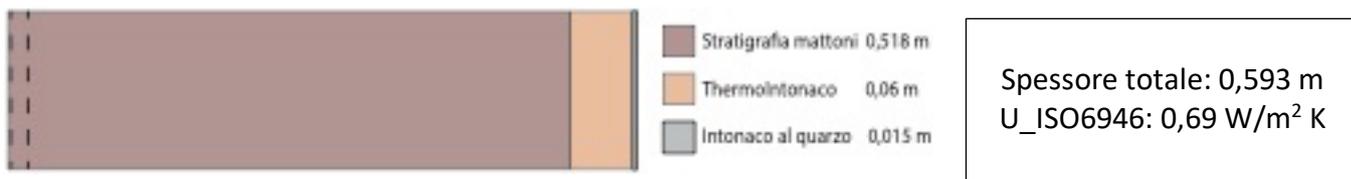
Trasmittanza termica

Trasmittanza:
 incremento
 medio rispetto
 la UNI 6946

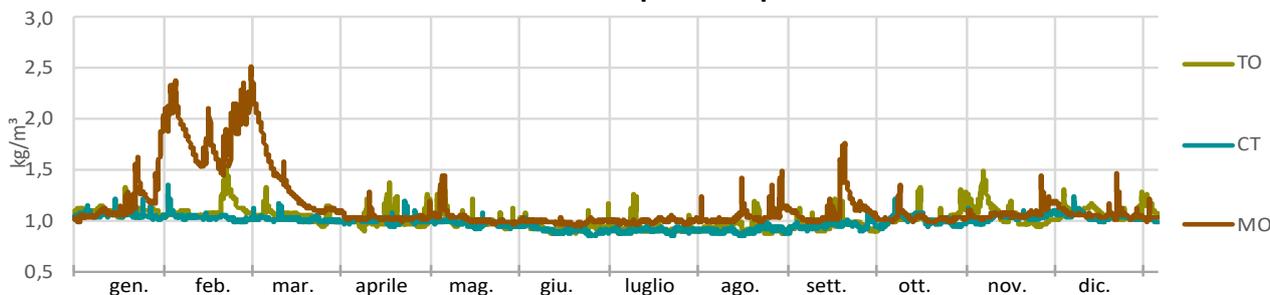
TO	16%
CT	11%
MO	13%



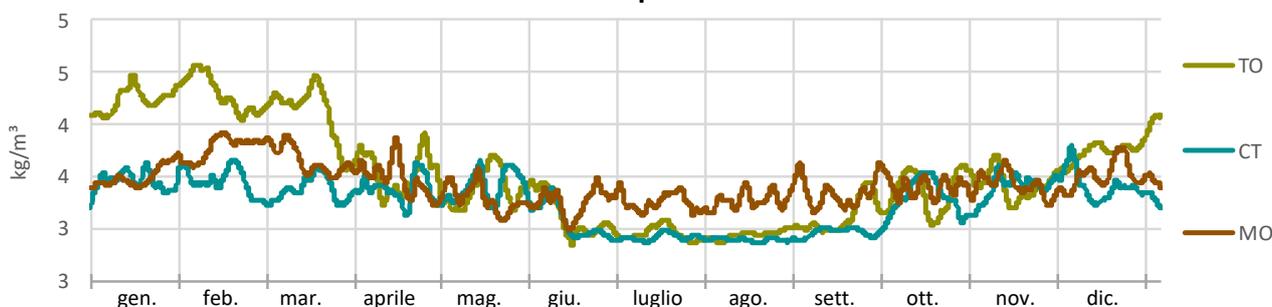
10.18. Thermolintonaco_mattoni



Contenuto d'acqua nella parete



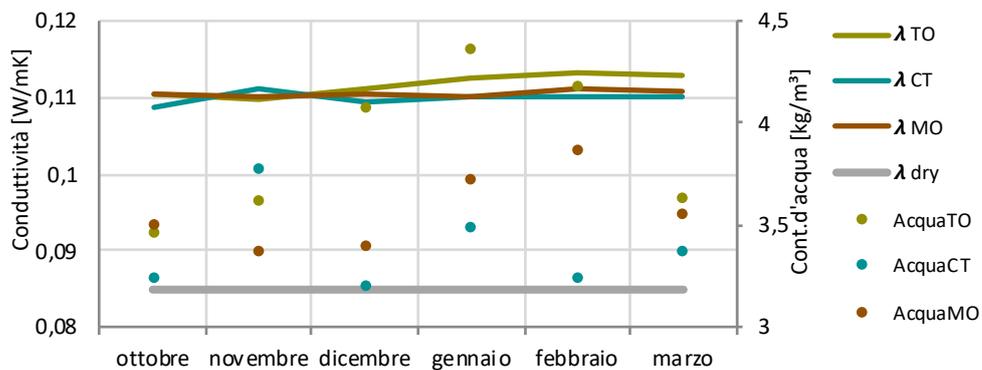
Contenuto d'acqua nell'intonaco



Conducibilità termica e contenuto d'acqua nell'isolante

Conducibilità:
 incremento
 medio rispetto
 il valore a
 secco

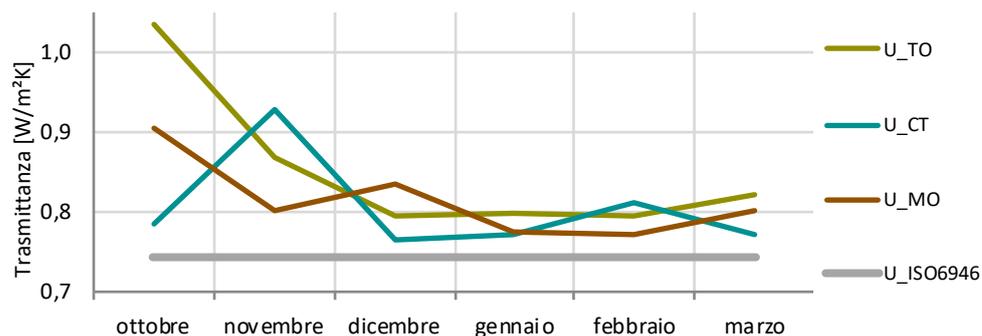
TO	32%
CT	29%
MO	29%



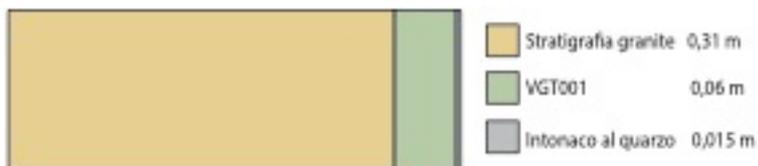
Trasmittanza:
 incremento
 medio rispetto
 la UNI 6946

TO	13%
CT	9%
MO	10%

Trasmittanza termica

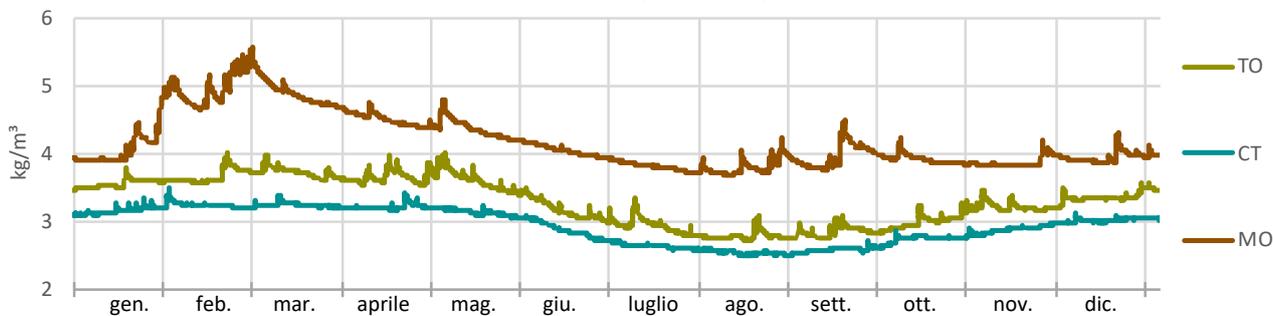


10.19. VGT001_granite

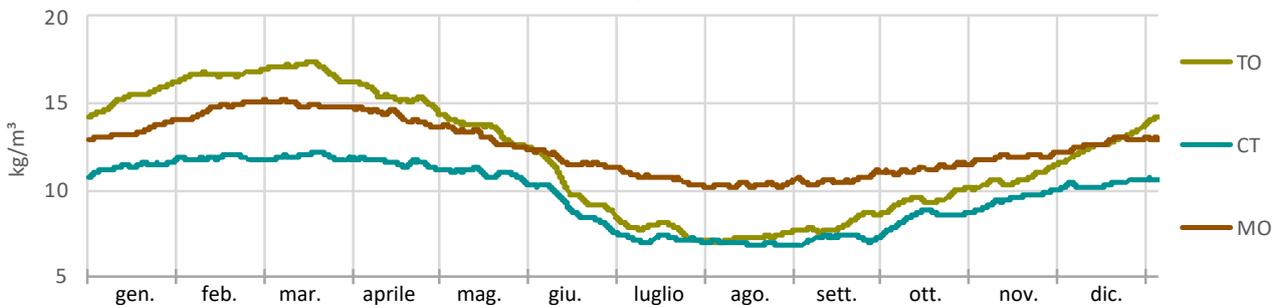


Spessore totale: 0,383 m
 U_ISO6946: 1,01 W/m² K

Contenuto d'acqua nella parete



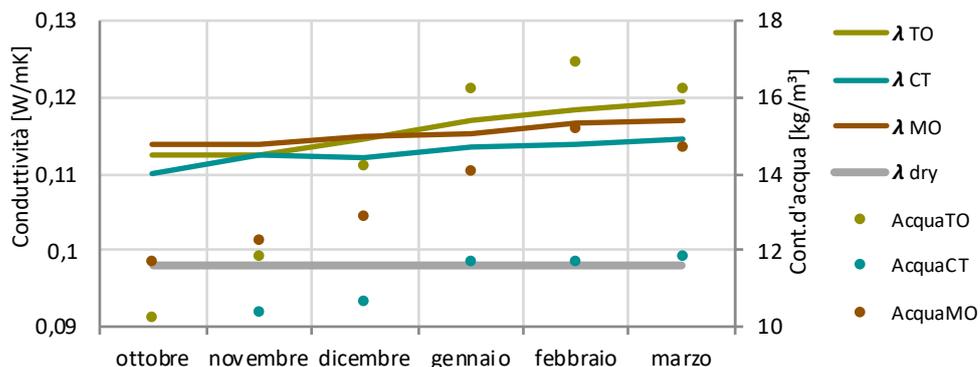
Contenuto d'acqua nell'intonaco



Conducibilità termica e contenuto d'acqua nell'isolante

Conducibilità:
 incremento
 medio rispetto
 il valore a
 secco

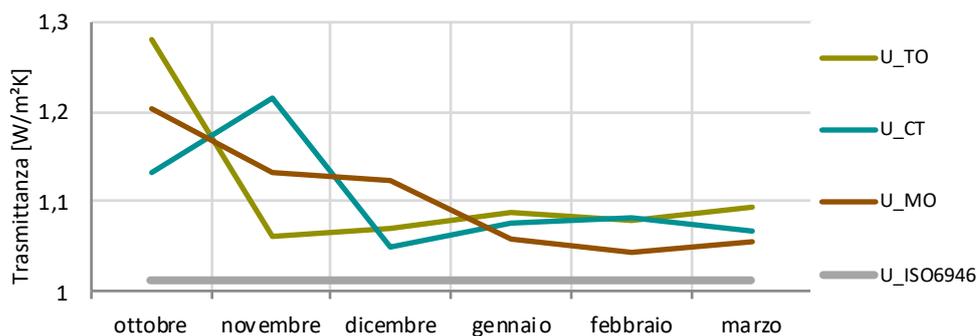
TO	18%
CT	15%
MO	17%



Trasmittanza termica

Trasmittanza:
 incremento
 medio rispetto
 la UNI 6946

TO	11%
CT	9 %
MO	9 %



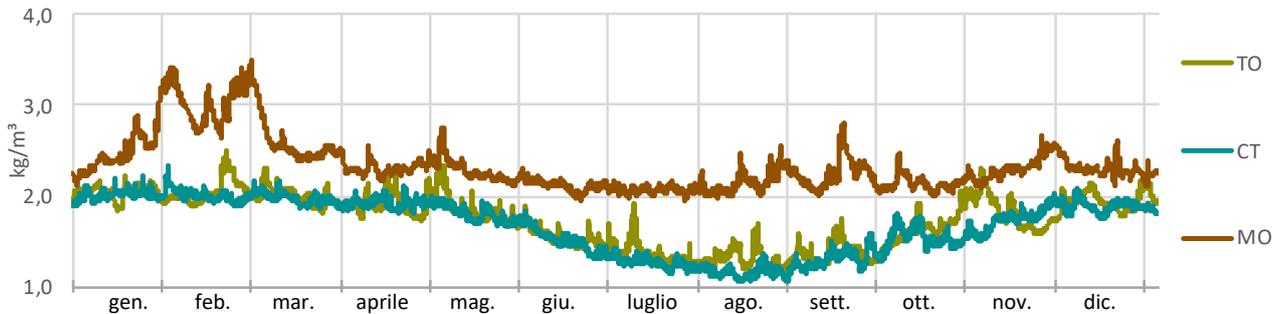
10.20. VGT001_intercapedine



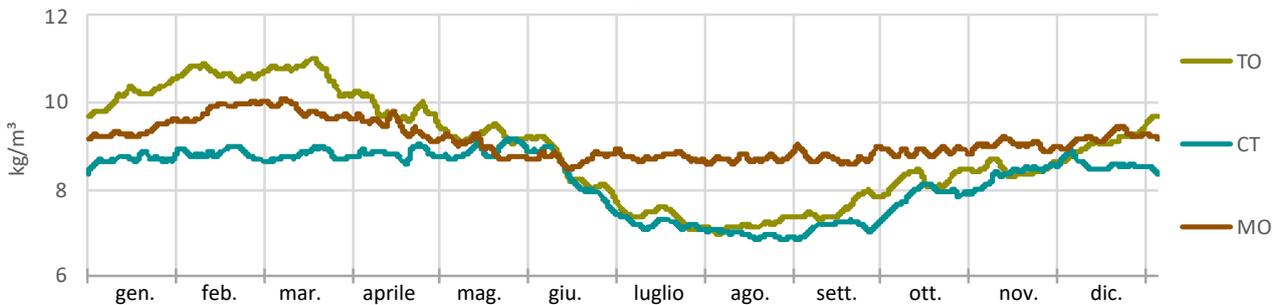
Stratigrafia intercap. 0,51 m
 VGT001 0,06 m
 Intonaco al quarzo 0,015 m

Spessore totale: 0,585 m
 $U_{ISO6946}$: 0,82 W/m² K

Contenuto d'acqua nella parete



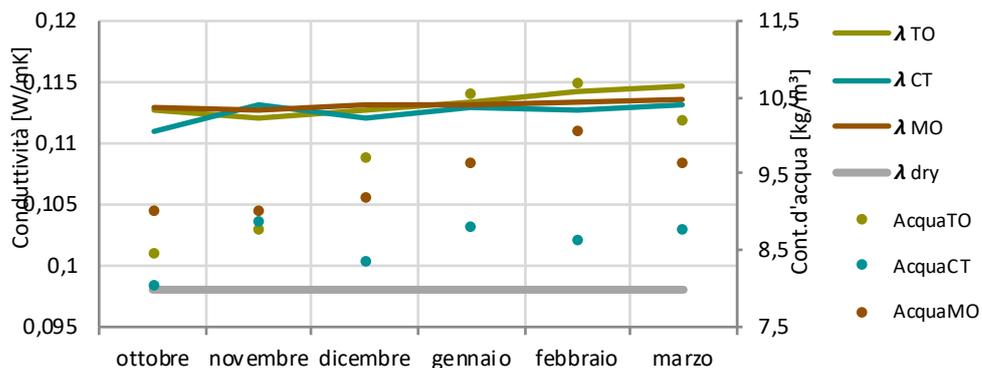
Contenuto d'acqua nell'intonaco



Conducibilità termica e contenuto d'acqua nell'isolante

Conducibilità:
 incremento
 medio rispetto
 il valore a
 secco

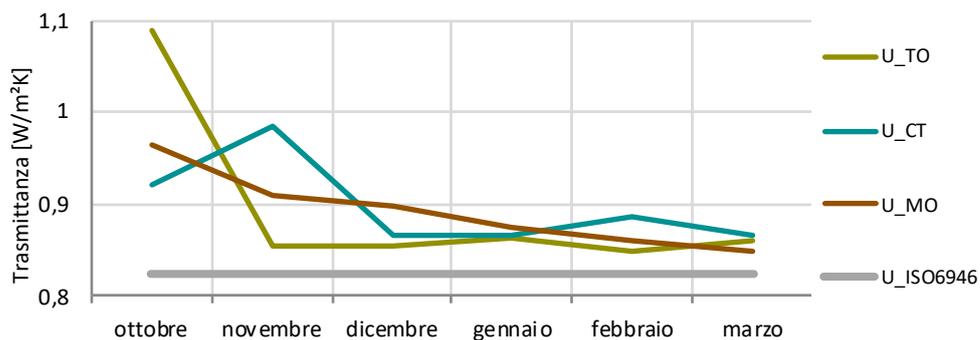
TO	15%
CT	14%
MO	15%



Trasmittanza:
 incremento
 medio rispetto
 la UNI 6946

TO	11%
CT	9%
MO	9%

Trasmittanza termica

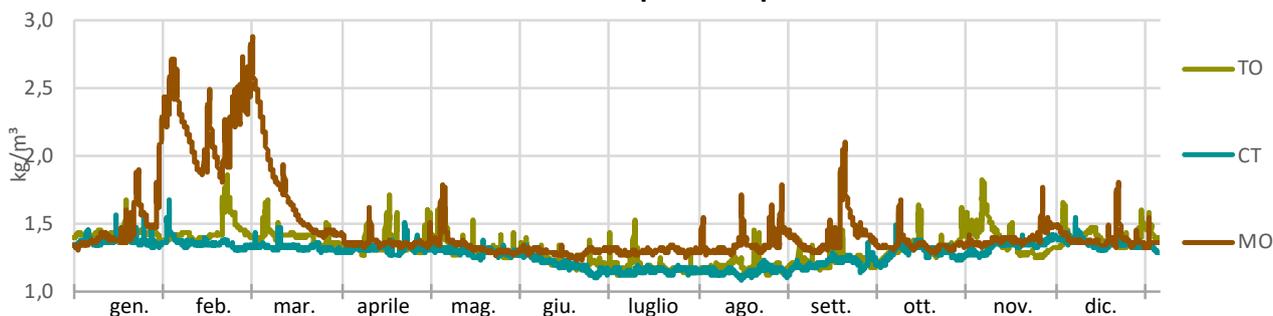


10.21. VGT001_mattoni

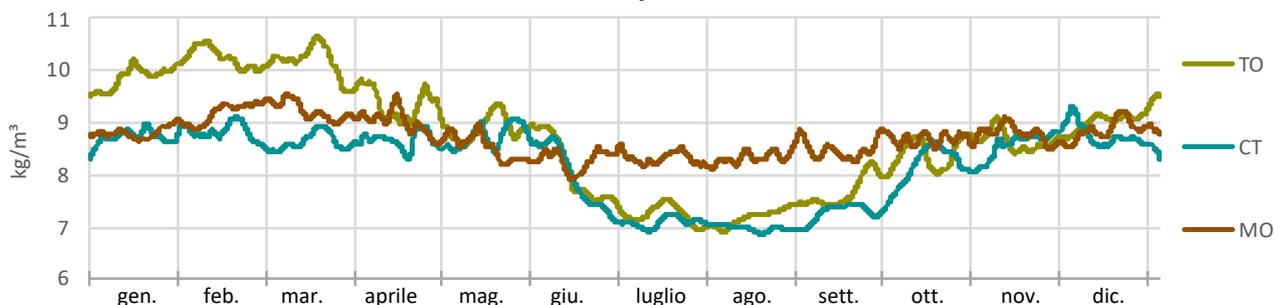


Spessore totale: 0,593 m
 U_ISO6946: 0,74 W/m² K

Contenuto d'acqua nella parete



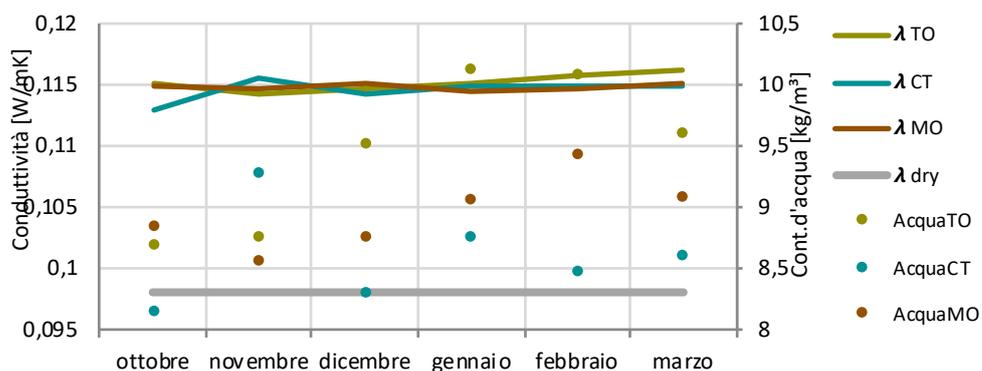
Contenuto d'acqua nell'intonaco



Conducibilità termica e contenuto d'acqua nell'isolante

Conducibilità:
 incremento
 medio rispetto
 il valore a
 secco

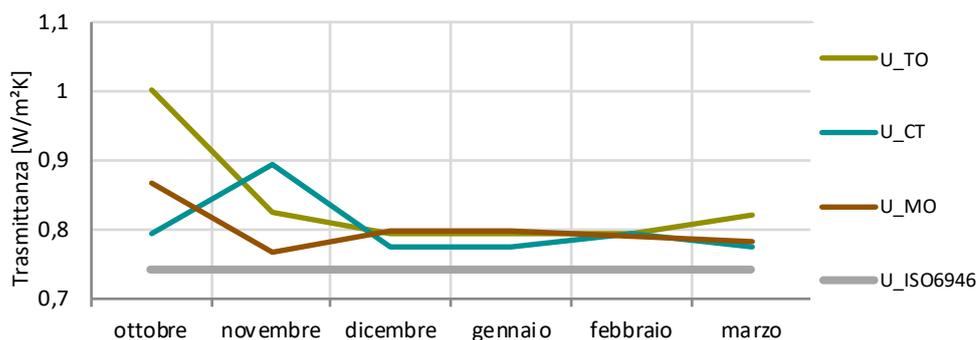
TO	17%
CT	16%
MO	17%



Trasmittanza termica

Trasmittanza:
 incremento
 medio rispetto
 la UNI 6946

TO	13%
CT	8%
MO	8%



11. Bibliografia

- [1] EURIMA, Ecofys VII-U values for Better Energy Performance of Buildings, European Insulation Manufactures Association, 2007
- [2] <https://ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-efficiency/energy-performance-of-buildings/overview>
- [3] E.N.E.A., «Rapporto annuale efficienza energetica (RAEE) 2018: analisi e risultati delle policy di efficienza energetica nel nostro Paese», 2018
- [4] <https://www.buildup.eu/en>
- [5] Ministero dello Sviluppo Economico; Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, «Strategia Energetica Nazionale 2017,» Roma, 2017.
- [6] Legge 9 gennaio 1991, n. 10 Norme per l'attuazione del Piano energetico nazionale in materia di uso nazionale dell'energia, di risparmio energetico e di sviluppo delle fonti rinnovabili di energia
- [7] Decreto ministeriale 26 giugno 2015 Applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e definizione delle prescrizioni e dei requisiti minimi degli edifici
- [8] https://www.istat.it/it/files/2013/03/9_Paesaggio-e-patrimonio-cult.pdf
- [9] <http://www.cartadelrischio.it/ita/info.asp>
- [10] Ministero per i Beni e le Attività Culturali, Direzione Generale per l'Architettura e l'Arte contemporanee, Istituto Centrale per il Restauro, A.M. Ferroni, C.Cacace, "Vulnerabilità archeologica" Roma, 2002
- [11] V. Corrado e E. Fabrizio, Fondamenti di termofisica dell'edificio e climatizzazione- seconda edizione, CLUT, 2014.
- [12] Legge n.90, 3 agosto 2013
- [13] Norma UNI TS 11300-1:2014
- [14] <http://www.treccani.it/vocabolario/intonaco/>

-
- [15] Norma UNI EN 998-1:2016 "Specifiche per malte per opere murarie - Parte 1: Malte per intonaci interni ed esterni"
- [16] Norma UNI EN ISO 10456:2008 "Materiali e prodotti per edilizia - Proprietà igrometriche - Valori tabulati di progetto e procedimenti per la determinazione dei valori termici dichiarati e di progetto", 2008.
- [17] <http://www.assogesso.it/prodotti-e-soluzioni-per-l-edilizia/prodotti/malte-e-intonaci>
- [18] <https://www.forumcalce.it/cose-la-calce/>
- [19] Norma UNI EN 197-1:2011 "Cemento - Parte 1: Composizione, specificazioni e criteri di conformità per cementi comuni"
- [20] <http://architetturedallaterra.it/intonaci-in-terra-cruda-il-rivestimento-piu-antico-del-mondo/>
- [21] <https://www.resine.it/prodotti-impermeabilizzanti/cat-6-altri-prodotti/art-179-aggrappante-per-intonaco-e-cemento-polietil-80>
- [22] Norma UNI EN 12620:2013 "Aggregati per calcestruzzo"
- [23] A. Reichel, A. Hochberg e C. Koepke, Praxis, Intonaci stucchi e pitture, Utet, 2007.
- [24] BigMat, Gli speciali di UpMagazine: "Intonaci, tradizione innovazione e modalità di posa"
<https://www.bigmat.it/export/sites/default/per-il-tuo-progetto/.content/pdf/Speciali/Intonaci.pdf>
- [25] C.Macchia, F.Ravetta. "Intonaci. Requisiti, Progettazione, Applicazione", Maggioli Editore, 1997
- [26] Norma UNI EN 998-2:2010 "Specifiche per malte per opere murarie - Parte 2: Malte da muratura"
- [27] Norma EN 13055:2016 "Lightweight aggregates"
- [28] <https://www.perlite.it/categoria/perlite-espansa/>
- [29] S. Abidi, B. Nait-Ali, Y. Joliff e F. C., «Impact of perlite, vermiculite and cement on the thermal conductivity of a plaster composite material: Experimental and numerical approaches», Composites: Part B, 2015.

-
- [30] O. Sengul, S. Azizi, F. Karaosmanoglu e A. Mehmet, «Effect of expanded perlite on the mechanical properties and thermal conductivity of lightweight concrete», *Energy and Buildings*, 2011.
- [31] C. Carbonaro, S. Tedesco, F. Thiebat, S. Fantucci, V. Serra, M. Dutto, "Development of a vegetal-based thermal plaster with low environmental impact: optimization process through an integrated approach" 6th International Building Physics Conference, 2015.
- [32] O. İltir "Use of Pumice in Mortar and Rendering for Lightweight Building Blocks", Eastern Mediterranean University, Master of Science in Civil Engineering, 2010
- [33] M. Davraz, L. Gunduz e E. Baspınar, «Lightweight Aggregated Foam Plaster for Thermal Insulation in Buildings», *Journal of Engineering Science and Design*, 2011.
- [34] H. Uysal, R. Demirboğa, R. Şahin e R. Gül, «The effects of different cement dosages, slumps, and pumice aggregate ratios on the thermal conductivity and density of concrete,» *Cement and Concrete Research*, 2004.
- [35] P. B. Malla, Vermiculites—Chemistry, Mineralogy, and Applications, in J. B. Dixon and D. G. Schulze (Eds.), *Soil Mineralogy with Environmental Applications*, SSSA Series No. 7, Soil Science Society of America, pp. 501–529, 2002
- [36] S. A. Suvorov and V. V. Skurikhin, "Vermiculite-A Promising Material for High-Temperature Heat Insulators", *Refract. Ind. Ceram.*, vol. 44, pp. 186–193, 2003
- [37] S. Abidi, B. Nait-Ali e Y. e. F. C. Joliff, «Impact of perlite, vermiculite and cements on the thermal conductivity of a plaster composite material: Experimental and numerical approaches», *Composites: Part B*, 2015.
- [38] O. Gencela, J. J. Del Coz Diaz, M. Sutcu, F. Koksald, F. Alvarez Rabanal, G. Martinez-Barrera e W. Brostow, «Properties of gypsum composites containing vermiculite and polypropylene fibers: Numerical and experimental results», *Energy and Buildings*, 2014.
- [39] https://it.wikipedia.org/wiki/Argilla_espansa
- [40] D. Konakova, M. Cachova, E. Vejmelkova, M. Keppert, M. Jerman, P. Bayer, P. Rovnanikova e R. Cerny, «Lime-based plasters with combined expanded clay-silica aggregate: Microstructure, texture and engineering properties», *Cement and Concrete Composites*, 2017.
- [41] <https://www.sapere.it/enciclopedia/diatomite.html>

-
- [42] O. Gencil, J. Jose del Coz Diaz, M. Sutcu, F. Koksal, F. P. Álvarez Rabanal e G. Martínez-Barrera, «A novel lightweight gypsum composite with diatomite and polypropylene fibers», *Construction and Building Materials*, 2016.
- [43] M. Barbero-Barrera, A. García-Santos e F. Neila-González, «Thermal conductivity of lime mortars and calcined diatoms. Parameters influencing their performance and comparison with the traditional lime and mortars containing crushed marble used as renders,» *Energy and Buildings*, 2014.
- [44] Y.V. Pukharenko, T.V. Kharitonova, “Lime Based Dry Mixes with Carbonate Aggregates”, *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)*, September 2019
- [45] <https://www.infobuildenergia.it/approfondimenti/sughero-materiale-naturale-edilizia-sostenibile-vantaggi-403.html>
- [46] A. Brása, F. Goncalves e P. Faustino, «Cork-based mortars for thermal bridges correction in a dwelling: Thermal performance and cost evaluation,» *Energy and Buildings*, 2013
- [47] J. Maia, N. M. Ramos, V. P. De Freitas e A. Sousa , «Laboratory Tests and Potential of Thermal Insulation Plasters», *Energy Procedia*, 2015.
- [48] A.-b. Cherki, B. Remy, A. Khabbazi, Y. Jannot e D. Baillis, “Experimental thermal properties characterization of insulating cork–gypsum composite”, *Construction and Building Materials*, 2014.
- [49] P.Rava, “Tecniche costruttive per l’efficienza energetica e la sostenibilità”, Maggioli, 2011.
- [50] Manuel Alejandro Pedreno-Rojas, Carmen Rodriguez-Linan, Maria Jesus Morales-Conde, Filomena Perez-Galvez¹, Paloma Rubio-de-Hita, Maria Isabel Romero-Gomez, “Influence of Wood and Plastic Waste as Aggregates in Gypsum Plasters”, IOP Publishing Ltd, 2019.
- [51] V. Corinaldesi, J. Donnini e A. Nardinocchi, “Lightweight plasters containing plastic waste for sustainable and energy-efficient building”, *Construction and Building Materials*, 2015.
- [52] <https://casanova.bio/storia-della-canapa/>
- [53] B. Mazhoud, F. Collet, S. Pretot e J. Chamoin, “Hygric and thermal properties of hemp-lime plasters”, *Building and Environment*, 2016.
- [54] R. Walker e S. Pavía, “Moisture transfer and thermal properties of hemp–lime concretes”, *Construction and Building Materials*, 2014.

-
- [55] I. Amara, A. Mazioud, I. Boulaued e A. Mhimid, "Experimental study on thermal properties of bio-composite (gypsum plaster reinforced with palm tree fibers) for building insulation" International Journal of Heat and Technology, 2017.
- [56] N. Benmansour, B. Agoudjil, A. Gherabli, A. Kareche e A. Boudenne, «Thermal and mechanical performance of natural mortar reinforced with date palm fibers for use as insulating materials in building,» Energy and Buildings, 2014.
- [57] B. D'Agata, Il guscio di mandorla come aggregato naturale nel termointonaco: sviluppo di prodotto e analisi teorico-sperimentale della prestazione energetico- ambientale, Torino, 2016.
- [58] C. Carbonaro, S. Tedesco, F. Thiebat, S. Fantucci, V. Serra e M. Dutto, «An integrated design approach to the development of a vegetal-based thermal plaster for the energy retrofit of buildings,» Energy and Buildings, 2016.
- [59] M. Martins, L. Nunes, F. Branco, "Plastering and Rendering Mortars Incorporating Regranulated of Expanded Cork to Improve Durability", International Conference on Durability of Building Materials and Components, Porto, 2011
- [60] V. Václavík, T. Dvorský, V. Dirner, J. Daxner e M. Šťastný, "Polyurethane foam as aggregate for thermal insulating mortars and lightweight concrete", Tehnicki Vjesnik, 2012.
- [61] S. Gutiérrez-González, J. Gadea, A. Rodríguez, C. Junco e V. Calderón, "Lightweight plaster materials with enhanced thermal properties made with polyurethane foam wastes", Construction and Building Materials, 2011.
- [62] <https://echa.europa.eu/nl/registry-of-restriction-intentions/-/dislist/details/0b0236e1829a30b8>
- [63] <https://www.poliespanso.it/polistirene-espanso-sinterizzato/>
- [64] A. Bicer, F. Kar, "Thermal and mechanical properties of gypsum plaster mixed with expanded polystyrene and tragacanth", Elazing, 2017.
- [65] C. Aciu, D. L. Manea, L. M. Molnar e E. Jumate, "Recycling of polystyrene in the composition of ecological mortars", 8th International Conference Interdisciplinarity in Engineering, 2014.
- [66] J. Šeputytė-Jucikė, G. A. Sezeman, M. Sinica e Modestas, «Impact of granules from crushed expanded polystyrene package on properties of thermos-insulating plaster» Journal of Civil Engineering and Management, 2014.

-
- [67] V. Corinaldesi, J. Donnini e A. Nardinocchi, "Lightweight plaster containing plastic waste for sustainable en energy efficient building", *Construction and Building Materials*, 2015.
- [68] Viola Hospodarova, Nadezda Stevulova, Jaroslav Briancin and Katarina Kostelanska, "Investigation of Waste Paper Cellulosic Fibers Utilization into Cement Based Building Materials", *MDPI*, 2018
- [69] M. G. A. Bentchikou, K. Scrivener, S. Kamel e S. Hanini, «Effect of recycled cellulose fibres on the properties of lightweight cement composite matrix», *Construction and Building Materials*, 2012.
- [70] S. Herrero, P. Mayor, F. Hernández-Olivares, "Influence of proportion and particle size gradation of rubber from end-of-life tires on mechanical, thermal and acoustic properties of plaster–rubber mortars", *Universidad Politécnica de Madrid, Madrid*, 2012.
- [71] <https://www.teknoring.com/guide/guide-architettura/guida-ai-pcm-i-materiali-a-cambiamento-di-fase/>
- [72] L. Ferrari, "Materiali a cambiamento di fase", *RCI*, novembre 2016.
- [73] <https://www.teknoring.com/guide/guide-architettura/guida-ai-pcm-i-materiali-a-cambiamento-di-fase/>
- [74] M.Jaworski, S. Abeid,"Thermal conductivity of gypsum with incorporated phase change material (PCM) for building applications", *Journal of Power Technologies* 91, 2011
- [75] A.Harland, C.Mackay, B.Vale, "Phase change materials in architecture", *Proceedings SB10 Wellington—innovation and transformation*, 2010, Wellington, New Zealand
- [76] J. Kośny, "PCM-Enhanced Building Components- An application of Phase Change Materials in Building Envelopes and Internal Structures", *Springer*.
- [77] Y. Kusama e Y. Ishidoya, "Thermal effects of a novel phase change material (PCM) plaster underdifferent insulation and heating scenarios", *Energy and Buildings*, 2017.
- [78] S. A. Memon, , "Phase change materials integrated in building walls: a state of the art review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014.
- [79] F. Grigolato, *Problemi e potenzialità degli accumuli termici a cambiamento di fase*, Padova: Università degli studi di Padova, Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Gestionale, 2016.

-
- [80] M. Karkria, M. Lachheb, F. Albouchi, S. B. Nasrallah e I. Krupac, "Thermal properties of smart microencapsulated paraffin/plaster composites for the thermal regulation of building," Energy and Buildings, 2015.
- [81] Z. Pavlik, A. Trnik, M. Keppert, J. Pokorn'ya, A. Trnika e R. Cern'ya, «Modified lime-cement plasters with enhanced thermal and hygric storage capacity for moderation of interior climate.,» Energy and Buildings, 2016.
- [82] T.Santos, L.Nunes, P.Faria,"Production of eco-efficient earth-based plasters: influence of composition on physical performance and bio-susceptibility", Journal of Cleaner Production 167, 2017
- [83] <http://aktarus-edilizia.com/nanotecnologia/aerogel/aerogel-un-po-di-storia/>
- [84] R. H. Nosrati e U. Berardi , "Hygrothermal characteristics of aerogel-enhanced insulating materials under different humidity and temperature conditions," Energy and Buildings, 2017.
- [85] S.S. Kistler, «Coherent Expanded Aero-gels and Jelliers», Nature, 1931.
- [86] S.S. Kistler, «Coherent Expanded Aero-gels», Nature, 1932.
- [87] <http://www.aerogel.org/?p=826>
- [88] P. Tewari, A. Hunt e K. Lofftus, «Ambient temperature supercritical drying of transparent silica aerogels», Materials Letters, 1985.
- [89] A. Soleimani Dorcheh, M. Abbasi, «Silica aerogel; synthesis, properties and characterization», Journal of materials processing technology, 2008.
- [90] L. Probst, L. Frideres, B. Pedersen e S. Clarke, «Advanced Materials. Aerogels, getting their second wind», 2015.
- [91] M. Sachithanadam, S. Chandrakant Joshi, "Silica Aerogel Composites. Novel Fabrication Methods"
- [92] L.Probst, L.Frideres, B.Pedersen, Steven Clarke, PwC Luxembourg, "Advanced Materials Aerogels, getting their second wind", European Union, 2015
- [93] <https://www.architetturaecosostenibile.it/materiali/vetro/aerogel-materiale-isolante-trasparente-innovativo>
- [94] E.S. Mazzucchelli, "Edifici ad energia quasi zero", Maggioli Editore, 2013.

-
- [95] S. Barbero, M. Dutto, C. Ferrua e A. Pereno, «Analysis on existent thermal insulating plasters towards innovative applications: Evaluation methodology for a real cost-performance comparison», *Energy and Buildings*, 2013.
- [96] <https://www.rinnovabili.it/featured/materiali-superisolanti-base-aerogel/>
- [97] B.P.Jelle, R.Baetens, A.Gustavsen, "Aerogel Insulation for Building Applications", *Energy Build*, 2011
- [98] C. Buratti e E. Moretti, «Experimental performance evaluation of aerogel glazing systems», *Applied Energy*, 2012.
- [99] C. Buratti, F. Merli e E. Moretti, «Aerogel-based materials for building applications: Influence of granule size on thermal and acoustic performance», *Energy and Buildings*, 2017.
- [100] L. Zhao-hui, D. Yi-dong, W. Fei e D. Zhi-ping, «Thermal insulation material based on SiO₂ aerogel», *Construction and Building Materials*, 2016.
- [101] <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=WO2011066209>
- [102] D. Doshi, T. Miller, J. Chase e C. M. Norwood, *Aerogel composites and methods dor making and using them*, 2011.
- [103] M. Calisesi, *Aerogel Incorporated Plasters and Mortars: the case study of precast panels*, Bologna, Università di Bologna, Tesi di Laurea in Fisica Tecnica Ambientale, 2017
- [104] S.Kim, J.Seo, J.Cha, S.Kim, "Chemical retreating for gel-typed aerogel and insulation performance of cement containing aerogel", *Construction and Building Materials* 40, 2013
- [105] M. F.Khamidi, C.Glover, S.A.Farhan, N.H.A.Puad, M.F.Nuruddin, "Effect of silica aerogel on the thermal conductivity of cement paste for the construction of concrete buildings in sustainable cities", *WIT Transactions on The Built Environment* Vol 137, 2014
- [106] C. Buratti, E. Moretti, E. Belloni e F. Agosti, «Aerogel Plasters for Building Energy Efficiency», *Nano and Biotech Based Materials for Energy Building Efficiency*, 2016.
- [107] M. de Fátima Júlio, A. Soares, L. M. Ilharco, I. Flores-Colen e J. de Brito, «Aerogel- based renders with lightweight aggregates: Correlation between molecular/pore structure and performance» *Construction and Building Materials*, 2016.
- [108] <https://www.roefix.it/Prodotti/Sistemi-di-isolamento-termico/Sistemi-di-intonaci-isolanti/FIXIT-222-Aerogel-Intonaco-altamente-isolante>

-
- [109] K. Ghazi Wakili, T. Stahl, E. Heiduk, M. Schussc, R. Vonbank, U. Pont, C. Sustr, D. Wolosiuk e A. Mahdavi, «High performance aerogel containing plaster for historic buildings with structured façades,» in 6th International Building Physics Conference, IBPC, 2015.
- [110] R. H. Nosrati e U. Berardi, «Long-term performance of aerogel-enhanced materials», in 11th Nordic Symposium on Building Physics, Trondheim, 2017.
- [111] U. Berardi e R. H. Nosrati, «Long-term thermal conductivity of aerogel-enhanced insulating», Energy, 2018.
- [112] <https://www.dracholin.de/produkte/daemmputze/orbith-daemmputze/>
- [113] U. Berardi, "Aerogel-enhanced systems for building energy retrofits: Insights from a case study", Energy and Buildings vol.159, 2018
- [114] S. Barbero, M. Dutto, C. Ferrua, A. Pereno, "Analysis on existent thermal insulating plasters towards innovative applications: Evaluation methodology for a real cost-performance comparison", Energy and Buildings, 2014
- [115] U. M. Trocino, "Retrofit energetico di edifici residenziali con intonaci di ultima generazione- Potenzialità di riduzione della domanda energetica tramite applicazione su larga scala", Politecnico di Torino, Tesi di laurea magistrale in Architettura per il progetto sostenibile, 2020
- [116] EN ISO 12570:2000, Hygrothermal performance of building material and products - Determination of moisture content by dring at elevated temperature
- [117] https://unikore.it/phocadownload/userupload/f2201fa35c/Conduktivita_termica_peso_specifico
- [118] <https://www.ibleacarrube.it/combustibili-vegetali/gusci-frutta-secca/>
- [119] UNI EN 12664:2002, Thermal performance of building materials and products - Determination of thermal resistance by means of guarded hot plate and heat flow meter methods - Products of high and medium thermal resistance
- [120] U. Sasso, "Dettagli per la Bioclimatica", Alinea Editrice, Firenze 2008.
- [121] Stefano Fantucci, Elisa Fenoglio, Valentina Serra, Marco Perino, Marco Dutto and Valentina Marino, Hygrothermal characterization process of a high performance Aerogel-based internal plaster, Sustainability in Energy and Buildings, Proceedings of SEB 2019, Budapest 2019

-
- [122] UNI EN 1946-3:2004, Prestazioni termiche di prodotti e componenti per l'edilizia - Criteri specifici per la valutazione di laboratori di misura delle proprietà di scambio termico - Misurazioni mediante apparecchiatura a termoflussimetri
- [123] ASHRAE Handbook; "Thermal properties of food" ; ResearchGate; 2006
- [124] UNI EN ISO 12571:2013, Hygrothermal performance of building material and products - Determination of hygroscopic sorption properties
- [125] UNI EN ISO 12572:2016, Hygrothermal performance of building material and products - Determination of water vapour transmission properties – Cup method
- [126] EN ISO 15148:2002 + A1, Hygrothermal performance of building materials and products - Determination of water absorption coefficient by partial immersion
- [127] E.Fenoglio, "Intonaci termoisolanti di nuova generazione", Politecnico di Torino, Tesi di laurea magistrale in Architettura per il progetto sostenibile, 2017
- [128] G. Grosso. "Analisi numerico sperimentale di rasature isolanti a base aerogel", Politecnico di Torino, Tesi di laurea magistrale in Ingegneria edile, 2018
- [129] D.Laggiard, I.M. Lisitano, "Il retrofit energetico in edilizia storica, il caso studio: il Monastero de Santa Maria de Monfero, in Galizia, Spagna", Politecnico di Torino, Tesi di laurea magistrale in Architettura per il progetto sostenibile, 2017
- [130] UNI EN ISO 6946:2018; Componenti ed elementi per edilizia - Resistenza termica e trasmittanza termica - Metodi di calcolo
- [131] EN 15026:2007, Hygrothermal performance of building components and building elements. Assessment of moisture transfer by numerical simulation.
- [132] Decreto del Presidente della Repubblica 26 agosto 1993, Regolamento recante norme per la progettazione, l'installazione, l'esercizio e la manutenzione degli impianti termici degli edifici ai fini del contenimento dei consumi di energia