

POLITECNICO DI MILANO
Scuola di Architettura Urbanistica Ingegneria delle Costruzioni
Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria dei Sistemi Edilizi



VALUTAZIONE DELLA DURABILITÀ E DEL RISCHIO DI
FORMAZIONE DI MUFFE DI PANNELLI PREFABBRICATI IN
LEGNO COIBENTATI CON PAGLIA

Relatore: prof. Bruno Daniotti

Correlatori: prof. Francesco Pittau
ing. Giampaolo Pilloni

Tesi di Laurea Magistrale di:

Luca MARZELLA
Matr. 968650

Anno Accademico 2022/2023

Indice

Abstract	11
1 Inquinamento ambientale, edilizia sostenibile e biobased material	1
1.1 Riscaldamento globale, effetto serra ed emissioni nel settore edile.....	1
1.2 Verso un'edilizia più Green	5
1.3 I "Biobased Material"	6
1.4 La disponibilità di terra coltivabile	14
1.5 La paglia nel mondo delle costruzioni	17
1.5.1 I primi utilizzi nell'edilizia.....	17
1.5.2 I primi utilizzi nell'edilizia.....	20
2 La paglia e la sua applicazione nel settore edile	21
2.1 Struttura della paglia e tipologie	21
2.2 Differenti metodi di costruzione	22
2.2.1 I primi utilizzi nell'edilizia.....	22
2.2.2 Sistema a balle di paglia non portanti	26
2.2.3 Sistema GREB	29
2.2.4 Sistema a cassoni.....	30
2.2.5 Riqualificazione edilizia.....	32
2.3 della paglia accoppiata ad altri materiali.....	34
2.3.1 Adobe	34
2.3.2 Paglia e Argilla.....	36
2.3.3 COB, massone, bague	36
2.3.4 Torchis	38
2.3.5 Terra-paglia	38
2.4 Particolari progetti e cantieri in paglia	39
2.4.1 Nuova costruzione.....	39

2.4.2	Recupero e riqualificazione.....	54
3	Proprietà e caratteristiche della paglia.....	63
3.1	Caratteristiche tecniche della paglia.....	63
3.1.1	Orientamento steli	63
3.1.2	Sisma	64
3.1.3	Isolamento termico.....	65
3.1.4	Isolamento acustico	67
3.1.5	Resistenza al fuoco.....	67
3.1.6	Resistenza all'umidità	68
3.1.7	Sostenibilità.....	69
3.1.8	Decomposizione	70
3.1.9	Possibilità di autocostruzione.....	71
3.1.10	Traspirabilità	71
3.1.11	Costo	72
4	Il problema della durabilità	73
4.1	Microorganismi e condizioni sfavorevoli.....	74
4.2	Analisi sperimentale.....	75
4.3	Analisi numerica del trasferimento di umidità	79
4.3.1	Metodi numerici di analisi.....	79
4.3.2	Metodi matematici.....	80
4.3.3	Analisi della letteratura	83
4.4	Come gestire l'umidità negli edifici in balle di paglia	90
5	PABLOK, un sistema innovativo.....	91
5.1	Da idea a realtà.....	91
5.2	Il pacchetto	92
5.2.1	Il sistema Platform Frame	95
5.2.2	Punti di forza e di debolezza	95
5.3	Il caso studio.....	97
6	Metodologia di analisi.....	103
7	Risultati	113
7.1	Il caso studio.....	113
8	Conclusioni e sviluppi futuri	123
8.1	Limiti tecnici e normativi.....	123
8.2	Analisi dei risultati	124

8.3 Sviluppi futuri	126
Bibliografia	129
Tesi.....	134
Sitografia.....	135
ALLEGATO A.....	137

Indice delle figure

Figura 1.1: Andamento delle emissioni di GHG nell'UE-28 dal 1990 al 2020.....	2
Figura 1.2: Emissioni globali di CO2 nei diversi settori.....	3
Figura 1.3: Legname da costruzione	7
Figura 1.4: Pannello isolante in micello.....	8
Figura 1.5: Pannello isolante in canapa.....	8
Figura 1.6: Isolante in fibra di lino.....	9
Figura 1.7: Pannello isolante in canapa.....	10
Figura 1.8: Perlite e vermiculite sotto forma di minerale.....	10
Figura 1.9: Pannelli isolanti in fibra di cocco	11
Figura 1.10: Isolante in fibra di juta	12
Figura 1.11: Isolante in fibra di kenaf.....	12
Figura 1.12: Pannelli isolanti in fibra di mais	13
Figura 1.13: Isolante in lana di pecora	14
Figura 1.14: Terreni esistenti per la coltivazione, la raccolta e la produzione di cereali (Eurostat 2017)	15
Figura 1.15: Domanda e offerta di paglia, legname, sughero e canapa nel mondo.....	16
Figura 1.16: Differenti formati standard di balle di paglia presenti sul mercato.....	19
Figura 2.1: Metodo Nebraska.....	24
Figura 2.2: Muro in paglia precompresso attraverso cinghie di polistirene e cavi.....	25
Figura 2.3: Muro in paglia precompresso attraverso cinghie di polistirene e cavi.....	26
Figura 2.4: Sistema costruttivo Post and Beam.....	28
Figura 2.5: Sistema costruttivo Infill.....	29
Figura 2.6: Sistema costruttivo GREB.....	30
Figura 2.7: Sistema costruttivo a cassoni	31
Figura 2.8: Riqualificazione edilizia: primo metodo.....	33
Figura 2.9: Riqualificazione edilizia: secondo metodo	34
Figura 2.10: Lavorazione e mattoni in adobe.....	35
Figura 2.11: Casa realizzata in adobe.....	36
Figura 2.12: Casa realizzata in adobe.....	37
Figura 2.13: Casa Rinaudi.....	39
Figura 2.14: Primo strato di balle, sollevato dal terreno con un cordolo in legno (sx) e applicazione intonaco di calce e sabbia (dx)	40
Figura 2.15: Ciabòt interno e struttura portante ricoperta da pannelli di compensato (sx) e tamponamenti esterni in paglia compressa (dx)	40
Figura 2.16: Strawbale House Vicenza.....	41
Figura 2.17: Tamponamenti esterni in paglia compressa.....	42

Figura 2.18: Struttura portante in legno con partizioni in balle di paglia compressa	42
Figura 2.19: Prospetto principale edificio	43
Figura 2.20: Dettaglio interni	43
Figura 2.21: Progetto “Nuova scuola dell’infanzia”	44
Figura 2.22: Dettaglio portico in legno con stratigrafia annessa	45
Figura 2.23: Nicchie realizzate nelle pareti per garantire luoghi di pausa e svago con stratigrafia annessa	45
Figura 2.24: A recipe to live	46
Figura 2.25: Dettaglio partizione esterna in balle di paglia	47
Figura 2.26: Dettaglio interni	47
Figura 2.27: Bale House	48
Figura 2.28: Dettaglio interni	49
Figura 2.29: Pianta piano terra e piano primo	49
Figura 2.30: Casa di paglia a Chamois	50
Figura 2.31: Vecchio / Nuovo	51
Figura 2.32: Trasporto pannelli prefabbricati	51
Figura 2.33: Fase di montaggio dei pannelli prefabbricati	52
Figura 2.34: Dettaglio interni	52
Figura 2.35: Larixhaus	53
Figura 2.36: Calkin’s House	55
Figura 2.37: Dettaglio pilastri aggiuntivi per sostenere il secondo piano	56
Figura 2.38: Rivestimento in paglia per l’intero edificio	56
Figura 2.39: Yannick Mollin House	57
Figura 2.40: Posizionamento balle di paglia nel telaio in legno	58
Figura 2.41: : Dettaglio pannelli di Celenit attorno alle finestre con intonaco di calce posato sulla paglia	58
Figura 2.42: House Simma	59
Figura 2.43: Dettaglio interni	60
Figura 2.44: Dettaglio costruttivo dell’adeguamento dei profili in legno per le finestre a causa dello spessore del cappotto in paglia	60
Figura 2.45: Casa di riso a Sciolze	61
Figura 2.46: Posizionamento pannelli copertura	62
Figura 2.47: Posizionamento cappotto in balle di paglia	62
Figura 3.1: Orientamento Steli	63
Figura 3.2: Effetti scossa 7.6	64
Figura 4.1: Tasso di decomposizione nei campioni di paglia con umidità inferiore al 39%	76
Figura 4.2: Tasso di decomposizione nei campioni di paglia con umidità superiore al 39%	77
Figura 4.3: Confronto concentrazioni di umidità sperimentali e simulate	84
Figura 4.4: Confronto risposte di UR sperimentali e numeriche scenario 3 a profondità di 3/7,5/12,5 cm	85
Figura 4.5: Confronto risposte di UR sperimentali e numeriche scenario 3 con e senza isteresi	86
Figura 4.6: Confronto del contenuto di umidità in condizioni di essiccazione (sx) e in condizioni reali (dx)	87
Figura 4.7: Confronto del contenuto di umidità con conducibilità termica e coefficiente di diffusione di umidità variabili e non	87
Figura 4.8: Stratigrafia dell’elemento analizzato	88
Figura 4.9: Analisi unidimensionale, Indice di crescita di muffa (sx) e massimo contenuto di umidità della paglia (dx) [μ s: fattore di resistenza al vapore della paglia]	89

Figura 4.10: Analisi bidimensionale	89
Figura 5.1: Stratigrafia Pablok Wall	93
Figura 5.2: Stratigrafia Pablok Roof	94
Figura 5.3: Edifici prima delle demolizioni	98
Figura 5.4: Nuovo progetto Scuola di Sarzana (SP)	98
Figura 5.5: Render Piazze	99
Figura 5.6: Schema funzionale Piano Terra	100
Figura 5.7: : Edifici A / B / C	101
Figura 5.8: Prestazione energetica con tecnologia Pablok	102
Figura 6.1 Diagramma delle condizioni favorevoli alla crescita di muffa	105
Figura 6.2 Stratigrafia CV.01	108
Figura 6.3 Stratigrafia CO.01	110
Figura 7.1 Profilo di temperatura CV.01 - (Sarzana)	113
Figura 7.2 Profilo di umidità relativa CV.01 - (Sarzana)	114
Figura 7.3 Profilo pressione di vapore CV.01 - (Sarzana)	114
Figura 7.4 Profilo di condensa CV.01 - (Sarzana)	114
Figura 7.5 Profilo delle temperature superficiali - CV.01 (Sarzana)	115
Figura 7.6 Profilo delle umidità relative superficiali - CV.01 (Sarzana)	115
Figura 7.7 VTT Mold Model delle tre interfacce più interne - CV.01 (Sarzana)	116
Figura 7.8 VTT Mold Model dell'interfaccia più critica - CV.01 (Sarzana)	116
Figura 7.9 Confronto UR effettivo e UR critico CV.01 - (Sarzana)	117
Figura 7.10 VTT Mold Model dell'interfaccia più critica - CV.01 (Sarzana – Totale Tenuta)	118
Figura 7.11 Profilo di temperatura CO.01 - (Sarzana)	119
Figura 7.12 Profilo di umidità relativa CO.01 - (Sarzana)	119
Figura 7.13 Profilo pressione di vapore CO.01 - (Sarzana)	119
Figura 7.14 Profilo delle temperature superficiali - CO.01 (Sarzana)	120
Figura 7.15 Profilo delle umidità relative superficiali - CO.01 (Sarzana)	120
Figura 7.16 VTT Mold Model Paglia interfaccia interna - CO.01 (Sarzana)	121
Figura 7.17 VTT Mold Model Paglia interfaccia esterna - CO.01 (Sarzana)	121
Figura 7.18 Confronto UR effettivo e UR critico CO.01 - (Sarzana)	122
Figura 8.1 VTT Mold Model dell' interfaccia esterna paglia nella copertura - CO.01 (Sarzana) .	124

Indice delle tabelle

Tabella 1.1: Requisiti edifici NZEB.....	4
Tabella 1.2: Requisiti edifici NZEB.....	18
Tabella 3.1 Dati di isolamento termico delle balle di paglia presenti in letteratura.....	66
Tabella 6.1: Identificazione dell'indice di crescita di muffa.....	104

Abstract

L'obiettivo di arrivare ad ottenere la neutralità climatica nelle costruzioni entro il 2050 necessita di una massiccia implementazione di soluzioni a base biologica per riuscire a sostituire tutti quei materiali ad alta intensità di carbonio utilizzati fino ad oggi. Lo studio e l'utilizzo di materiali come la paglia, il lino, la canapa e le fibre vegetali o animali ha infatti sempre più preso piede nell'edilizia moderna. Essi sono caratterizzati da basse emissioni di carbonio per la raccolta e la lavorazione e da eccellenti proprietà termiche e acustiche, grazie alle quali consentono la sostituzione dei tradizionali materiali isolanti. A differenza di quelli a base biologica, infatti, gli isolanti sintetici e minerali non hanno la capacità di immagazzinare carbonio durante la loro vita utile e rimuovere CO₂ durante la rapida rigenerazione delle colture. Questo, legato alla grande quantità di energia necessaria alla loro lavorazione, sta portando a un obbligatoria evoluzione dei "Biobased material".

Tuttavia, sono presenti diversi ostacoli che contribuiscono a limitare l'implementazione di soluzioni a base biologica nel mondo delle costruzioni. Una delle barriere più critiche che rende questi materiali ancora poco sicuri una volta in opera è l'incertezza sui problemi legati alla durabilità. Essendo già presente e utilizzato da molti anni, per il legno massiccio esistono diversi metodi di prova standard per valutarne la durabilità. Seppur sempre a base biologica, per gli altri materiali non legnosi questi standard non sono applicabili, lasciando così un buco normativo che possa regolarne e definirne il comportamento durante la loro vita utile. Inoltre, seppur notevolmente influenti sul rischio di decadimento fungino, le dinamiche di trasferimento dell'umidità nel materiale non sono considerate. Di conseguenza, la modellazione del trasferimento combinato di calore, aria e umidità (HAM) diventa un'importante area di ricerca per valutare la natura complessa e l'interazione tra lo stoccaggio dell'umidità e le proprietà di trasporto.

All'interno di questa tesi si propone di studiare il rischio di decadimento fungino dovuto alla crescita di muffe di un nuovo pannello prefabbricato in legno con isolamento in fibre di paglia, sviluppato da GP Project srl. Per un'analisi più completa è stato preso come caso di studio un edificio scolastico di riferimento situato nel Nord Italia, per prevedere il rischio di perdita di prestazioni a causa del possibile degrado durante la vita utile dell'edificio. Sono inoltre state valutate diverse condizioni climatiche e differenti configurazioni di materiali per individuare problemi e opportunità, utilizzando materiali da costruzione a base biologica e formulare raccomandazioni generali per i progettisti.

1 Inquinamento ambientale, edilizia sostenibile e biobased material

1.1 Riscaldamento globale, effetto serra ed emissioni nel settore edile

Il riscaldamento globale è diventato negli ultimi anni uno degli argomenti centrali dei dibattiti politici, ma sono già decenni che la comunità scientifica condanna il preoccupante cambiamento climatico del Pianeta. Oggi ci stiamo imbattendo sempre più frequentemente in fenomeni climatici molto più estremi e devastanti, causati dall'eccessivo innalzamento delle temperature che stanno inoltre portando a reagire molte specie animali, che cominciano a migrare verso ambienti più freschi e ricchi di vegetazione. La responsabilità di questi cambiamenti è dell'essere umano che si trova ora davanti a un'ultima possibilità di rivoluzionare il suo stile di vita per provare a salvare il pianeta Terra.

Un parametro molto importante da controllare per iniziare a combattere questa battaglia è quello delle emissioni di gas serra (GHG – Greenhouse Gases), che deve essere necessariamente ridotto nel più breve tempo possibile. [1] La loro concentrazione all'interno dell'atmosfera è rapidamente aumentata negli ultimi secoli e una conseguenza diretta di tale fenomeno è l'innalzamento della temperatura media del pianeta.

Nel corso degli ultimi anni la comunità internazionale ha cominciato a promuovere progetti e agende condivise sui temi dello sviluppo ecosostenibile che hanno portato a numerosi incontri con primario obiettivo l'individuazione e l'adozione di strategie più efficaci nella riduzione delle emissioni di gas serra. [2] È però necessario ricordare che, attualmente, le numerose iniziative volte alla sensibilizzazione e alla responsabilizzazione promosse dalla maggior parte dei paesi industrializzati non hanno portato ai risultati sperati.

Analizzando la cronistoria degli ultimi decenni delle convenzioni sull'ambiente è possibile definire l'inizio dei principali accordi internazionali sul clima con la “Conferenza sull'Ambiente e lo Sviluppo delle Nazioni Unite”, chiamata anche Summit della Terra, tenutasi a Rio de Janeiro nel 1992. Nel 1997, dopo pochi anni, con l'obiettivo di ridurre e limitare la quantità di emissioni di gas serra è stato ratificato il “Protocollo di Kyoto”,

all'interno del quale veniva considerato come valore di riferimento le emissioni di GHG del 1990.

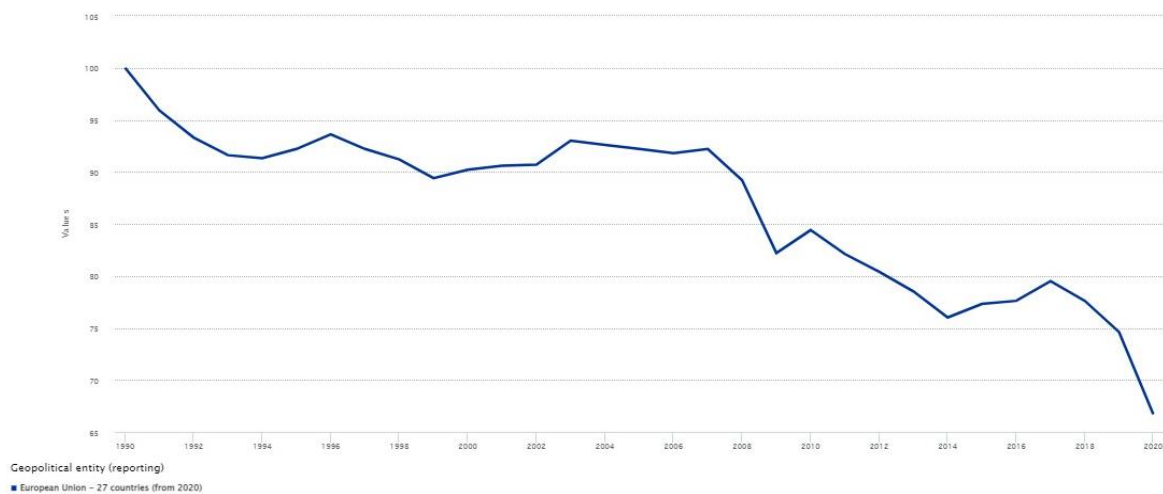


Figura 1.1: Andamento delle emissioni di GHG nell'UE-28 dal 1990 al 2020

Come si può analizzare nella Figura 1.1, la quantità di emissioni di CO₂ in Europa è notevolmente diminuita ma, nonostante ciò, gli obiettivi prefissati sono ancora lontani. Per contrastare i cambiamenti climatici in atto i principali obiettivi prefissati dall'Unione Europea impongono una riduzione rispetto al 1990 del 55% delle emissioni di CO₂ entro il 2030 e il raggiungimento della neutralità climatica al 2050.

Per riuscire a raggiungere questo traguardo è indispensabile che ogni nazione monitori le proprie emissioni di CO₂ e si impegni a diminuirle attraverso operazioni in grado di contrastare l'inquinamento proveniente da ogni settore.

In particolare, i gas serra maggiormente nocivi che devono necessariamente essere ridotti sono:

- CO₂ (anidride carbonica): viene prodotta utilizzando combustibili fossili in ambito energetico e nell'attività industriale così come nei trasporti e nel riscaldamento degli edifici;
- CH₄ (Metano): viene prodotto dalle discariche di rifiuti e nell'allevamento zootecnico;
- N₂O (Protossido d'azoto): viene prodotto nel settore agricolo e in quello dell'industria chimica;
- HFC (Idrofluorocarburi): sono impiegati nel settore chimico e manifatturiero;
- PFC (Perfluorocarburi): sono impiegati nel settore chimico e manifatturiero;
- SF₆ (Esfluoruro di zolfo): viene impiegato nel settore chimico e manifatturiero.

Seppur non il più pericoloso, il gas più critico per l'effetto serra resta la CO₂, che con un contributo del 55% supera notevolmente tutti gli altri componenti.

Dopo i valori mondiali minimi del 2020, registrati a seguito della pandemia, le emissioni globali di anidride carbonica sono state di gran lunga superiori, raggiungendo nel 2022 un valore che di poco non supera il record negativo del 2019 di 37,9 Gt.

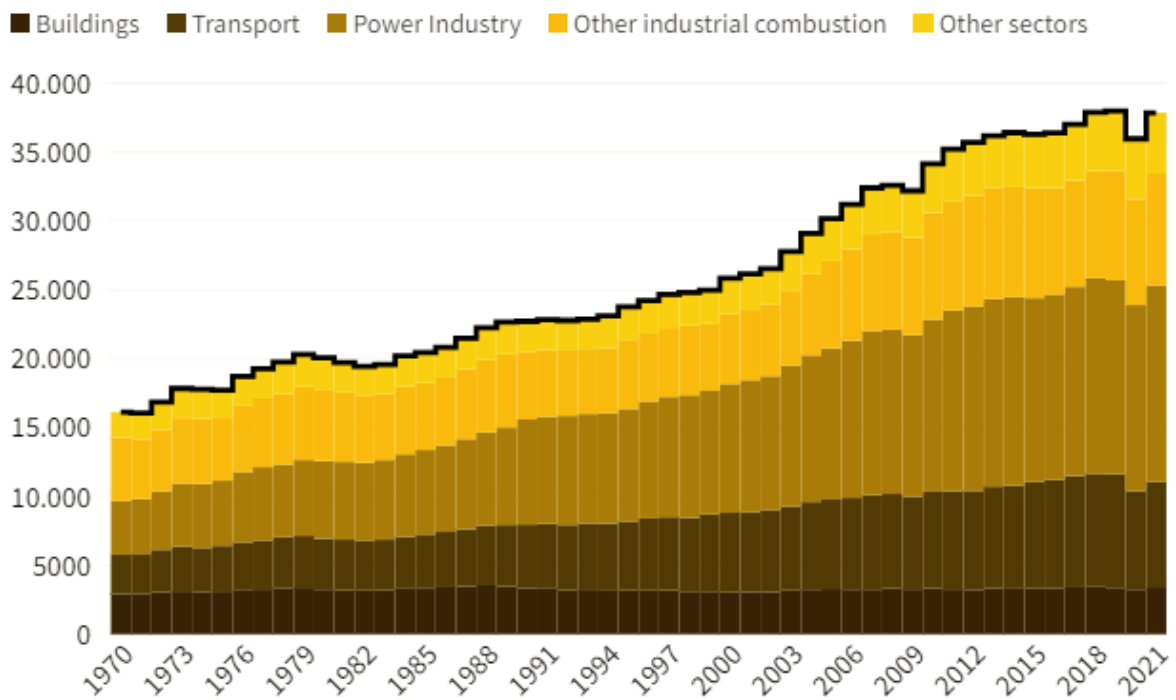


Figura 1.2: Emissioni globali di CO2 nei diversi settori

È ormai noto che il settore edile svolge un ruolo critico per quanto riguarda le emissioni di CO2 nell'atmosfera. L'urbanizzazione sta infatti avvenendo a un ritmo molto elevato negli ultimi anni; la costruzione di edifici e il loro funzionamento continuano a contribuire in modo massiccio non solo all'inquinamento causato dai gas serra ma anche a un consumo energetico significativo. [3] All'interno dell'UE, gli edifici sono infatti responsabili di circa il 36% di tutta la produzione di emissioni di CO2 e del 40% del consumo energetico, il 60% del quale è utilizzato dagli impianti di riscaldamento e raffrescamento. [4] Tutto ciò è accentuato dalle prestazioni mediocri del patrimonio edilizio costruito durante il periodo del dopoguerra che oggi necessiterebbe di una riqualificazione energetica e strutturale. Se nei prossimi anni non verranno intraprese azioni incisive, questo valore continuerà ad aumentare costantemente.

Attraverso la manutenzione degli edifici esistenti e con la nuova costruzione di edifici green, seguendo l'indicazione delle politiche europee a lungo termine, è infatti possibile fornire un grosso contributo nella riduzione di gas serra. Per provare a raggiungere gli obiettivi fissati dall'UE per il 2050 sarà necessario ridurre almeno del 90% l'emissione di questi gas rispetto ai valori registrati nell'ultimo anno. [5]

1. Inquinamento ambientale, edilizia sostenibile e biobased material

La situazione globale è critica, la riduzione del consumo energetico è indispensabile, e la soluzione più realistica per il raggiungimento di questi risultati è l'incremento di risorse rinnovabili e l'utilizzo di materiali alternativi a quelli a cui siamo abituati oggi.

Proprio attraverso la ricerca di questi risultati si è sviluppata la definizione di edifici nZEB (nearly Zero Energy Building), ovvero edifici con prestazioni molto elevate che arrivano ad avere "quasi zero emissioni", e che sono ormai un parametro obbligatorio da rispettare nella costruzione di nuovi edifici. Ricorrendo all'utilizzo di soluzioni tecnologiche e progettuali innovative e sostenibili, si possono quindi costruire strutture con consumi quasi azzerati in cui la domanda di energia restante viene prodotta attraverso fonti sostenibili (Göswein et al., 2021).

Si riportano nella **Tabella 1.1** le caratteristiche necessarie a definire un edificio nZEB.

Requisiti da rispettare nella progettazione di nZEB _Decreto Ministeriale 26.06.2015		
H_T [W/ m ² K]	Coefficiente medio globale di scambio termico per trasmissione per unità di superficie disperdente	$H_T < H_T \text{ limite}$ tabulato e variabile con S/V e zona climatica
$A_{sol,est}/ A_{sup \text{ utile}}$	Area solare equivalente estiva per unità di superficie utile	$A_{sol,est}/ A_{sup \text{ utile}} \leq A_{sol,est}/ A_{sup \text{ utile}} \text{ limite}$ Il valore di riferimento è tabulato e varia con la categoria di edificio
η_H η_C η_W	Efficienze medie stagionali di impianto di climatizzazione invernale (H), impianto di climatizzazione estiva compreso l'eventuale controllo dell'umidità (C), impianto di produzione acqua calda sanitaria (W)	$\eta_H > \eta_H \text{ limite}; \eta_C > \eta_C \text{ limite}; \eta_W > \eta_W \text{ limite}$ Valori, in forma tabellare, delle efficienze medie dei sottosistemi di utilizzazione e di generazione, riferiti all'edificio di riferimento 2019-2021
$EP_{H,nd}$ [kWh/m ²]	Indice di prestazione termica utile per riscaldamento	$EP_{H,nd} < EP_{H,nd, \text{limite}} (2019,2021)$ Limite relativo all'edificio di riferimento
$EP_{C,nd}$ [kWh/m ²]	Indice di prestazione termica utile per il raffrescamento	$EP_{C,nd} < EP_{C,nd, \text{limite}} (2019,2021)$ Limite relativo all'edificio di riferimento
$EP_{gl,tot}$ [kWh/m ²]	Indice di prestazione globale dell'edificio	$EP_{gl,tot} < EP_{gl,tot, \text{limite}} (2019,2021)$ Limite relativo all'edificio di riferimento
U trasmittanze termiche dell'involucro [W/m ² K]	Trasmittanze pareti, copertura, pavimento, chiusure tecniche trasparenti e opache e dei cassonetti, di separazione tra edifici o unità immobiliari confinanti	U < Valori, in forma tabellare, delle trasmittanze termiche delle strutture di involucro riferiti all'edificio di riferimento 2019-2021
Integrazione delle fonti di energia rinnovabile (FER) _Decreto Legislativo 28/2011		
Percentuale minima di copertura del consumo energetico complessivo (per produzione di acqua calda sanitaria, riscaldamento e raffrescamento) 50% <small>proroga 1.1.2018</small> Nessun obbligo se l'edificio è allacciato ad una rete di teleriscaldamento che ne copra l'intero fabbisogno di calore per il riscaldamento degli ambienti e la fornitura di ACS	Percentuale minima di copertura del consumo energetico per la produzione di ACS 50% Nessun obbligo se l'edificio è allacciato ad una rete di teleriscaldamento che ne copra l'intero fabbisogno di calore per il riscaldamento degli ambienti e la fornitura di ACS la fornitura di ACS	Potenza elettrica degli impianti alimentati da fonti energetiche rinnovabili da installare sopra o all'interno dell'edificio o nelle relative pertinenze 1/50 dell'Impronta dell'edificio
Per gli edifici pubblici tali obblighi per le fonti energetiche rinnovabili sono incrementati del 10%.		

Tabella 1.1: Requisiti edifici NZEB

Ridurre la quantità di CO2 emessa dagli edifici porterebbe vantaggi economici per l'Europa, perché attraverso i costi necessari per mitigare gli effetti negativi dell'anidride carbonica sarebbe possibile investire maggiormente in altre politiche economiche., ottenendo anche migliori condizioni di vita per tutte le persone.

Le risorse sostenibili sono quindi un primo passo verso il raggiungimento di un'edilizia autosufficiente che oltre all'utilizzo di energia pulita, attraverso materiali biologici, utilizzati in passato nel mondo delle costruzioni e dimenticati col passare degli anni, porterà a quella che viene definita Bioedilizia: ovvero un'edilizia basata sull'uso di risorse caratterizzate da un'origine biologica e da un'applicazione eco-friendly e attentamente controllata. [6]

1.2 Verso un'edilizia più Green

Durante il processo di costruzione di un edificio viene spesso trascurato il dispendio energetico legato al processo di estrazione, produzione e trasporto dei materiali. È necessario quindi individuare alcuni dei principi alla base dello sviluppo di tecnologie edilizie sostenibili:

- Risparmio energetico;
- Riduzione dell'uso di materiali ad "alta energia";
- Minimizzazione dei trasporti prediligendo l'utilizzo di materiali e risorse locali;
- Utilizzo di rifiuti industriali e minerali per la produzione dei materiali da costruzione;
- Riciclaggio di rifiuti edili;
- Utilizzo di fonti di energia rinnovabili.

La ricerca di materiali che rispettino i seguenti punti permetterebbe di ridurre la dispersione energetica e causerebbe danni minimi all'ambiente. La costruzione di edifici a basso consumo energetico, attraverso l'utilizzo di prodotti rinnovabili, potrebbe portare a una riduzione di quasi il 50% dell'energia incorporata [7].

Le maggior parte delle definizioni esistenti inducono potenzialmente ad un errore di valutazione perché considerano la prospettiva limitata del consumo di energia che tiene conto solo delle fasi di gestione e uso dell'edificio e non tengono in considerazione il consumo globale di energia durante il suo intero ciclo di vita. [8] La CO₂ generata viene prodotta durante tutte le differenti fasi che compongono il ciclo di vita di un edificio, ovvero:

- Fase di produzione dei materiali e di coltivazione delle materie prime;
- Fase di lavorazione e montaggio edificio;
- Fase di vita operativa dell'edificio;
- Fase di demolizione e smontaggio dell'edificio;
- Fase di riciclo o smaltimento dei materiali che componevano l'edificio.

A seguito della necessità ambientale di edifici più green e del maggiore interesse riscontrato negli ultimi anni per la sostenibilità, si può osservare che è effettivamente sempre più cresciuto l'interesse nell'utilizzo di questi prodotti che durante il loro ciclo di vita, oltre a ridurre le emissioni di gas serra, garantiscono un rilascio di sostanze tossiche nell'ambiente pari a zero. La facilità di reperire questi materiali sul mercato, il grande risparmio energetico rispetto ai prodotti tecnologicamente avanzati e la loro natura biologica e sostenibile sta portando a un più frequente utilizzo sia in casi di ristrutturazione che di costruzione. [9]

I materiali biologici, come la paglia, abbondano sulla superficie della terra e spesso la necessità del loro smaltimento causa inutilizzo comporta dispersioni di energia ingenti, che potrebbero essere notevolmente ridotte attraverso il loro impiego nel mondo delle

costruzioni. [10] Inoltre, i prodotti Bio-based ottenuti dalle colture, hanno un bassissimo consumo di energia durante la fase di produzione, hanno la capacità di assorbire CO₂ al momento dell'installazione e, se trattati nelle zone limitrofe al sito produttivo, riescono ad abbattere notevolmente i costi di trasporto. Tutte queste caratteristiche rendono questi materiali essenziali e indispensabili per il raggiungimento degli obiettivi prefissati nei prossimi decenni, seppur necessitino di studi approfonditi per comprendere maggiormente alcune proprietà che risultano essere il motivo del loro scarso utilizzo.

Nell'edilizia moderna esistono svariati prodotti di origine vegetale (come paglia, sughero, cotone, Lino, Legno e canapa) e di origine animale (ad esempio la lana di pecora) che possono essere utilizzati per svariate applicazioni. Questo lavoro tratterà l'utilizzo della paglia nel settore edile, analizzando nel dettaglio una tecnologia già presente sul mercato; l'obiettivo principale, dopo un'analisi delle caratteristiche di questo materiale, è quello di approfondire il discorso legato alle criticità di durabilità e manutenzione, integrandolo allo studio del Life Cycle Assessment degli edifici in paglia. Questo materiale è infatti utilizzato nel mondo dell'edilizia fin dall'antichità, ma solo negli ultimi 25 - 30 anni ha nuovamente riscontrato interesse in diversi paesi del globo grazie alle sue ottime proprietà e alla sua natura biologica e sostenibile.

1.3 I “Biobased Material”

Un materiale Bio-based si definisce tale quando è composto, interamente o almeno in parte, da elementi che derivano da biomasse, ovvero da materiali che hanno un'origine organica e che non hanno subito un processo di fossilizzazione. Quindi, per definire un materiale a base biologica, è necessario che questo non sia di origine fossile ma rinnovabile. Ciò significa che la materia prima considerata deriva da una fonte che si rigenera autonomamente e che, oltre a non rilasciare CO₂ in ambiente, non necessita l'utilizzo di energia per la sua produzione. Proprio per la necessità di ridurre il più possibile le emissioni e limitare i dispendi energetici i Bio-based material stanno sempre più prendendo piede anche nell'edilizia moderna.

Durante lo studio di questi materiali, viene posta particolare attenzione su alcuni requisiti che devono essere soddisfatti per poter garantire determinate prestazioni nel settore delle costruzioni. È possibile riassumerli brevemente all'interno dei seguenti punti:

- Resistenza meccanica.
- Sicurezza in caso di incendio.
- Utilizzo di materie prime abbondantemente disponibili in natura.
- Riciclabilità dei materiali utilizzati.
- Facilità di smaltimento con limitazione dei danni ambientali.
- Ciclo di vita sostenibile, basso emissivo e poco inquinante.
- Sicurezza in fase produttiva e di esercizio per le persone.

- Isolamento acustico e termico.
- Risparmio energetico.
- Assenza nel materiale di sostanze pericolose che generino il rilascio di elementi di natura chimica, biologica o di sostanze come fibre e particelle radioattive.

È quindi evidente che non tutti i materiali a base biologica possono soddisfare questi requisiti e che è necessario uno studio approfondito di ciascuno di essi prima di poterlo utilizzare su una struttura edile. Studi, test di laboratorio e prove sul campo hanno però portato all'utilizzo di diversi materiali di questo tipo, in grado di soddisfare le prestazioni richieste per mantenere un confort e una sicurezza adeguati, riducendo il loro impatto ambientale. Oltre alla paglia, che verrà analizzata nel dettaglio nei prossimi capitoli, si riportano di seguito alcuni esempi che tutto oggi sono presenti nel mondo delle costruzioni:

Legname



Figura 1.3: Legname da costruzione

Da sempre presente nel mondo dell'edilizia, il legno è un materiale che viene impiegato per innumerevoli soluzioni architettoniche. Vista la grande conoscenza del materiale e la sua tradizione in ogni angolo del pianeta, il legno può essere considerato probabilmente il materiale a base biologica per eccellenza. Viene applicato come struttura portante per edifici di grandi o piccole dimensioni, come sottostruttura di partizioni intere ed esterne o anche come semplice arredo o elemento di design all'interno della struttura edilizia. Per quanto molto utilizzato, la produzione di legname richiede un ciclo molto lungo rispetto a quello di tanti altri bio-based material di origine vegetale, che in poco tempo dalla loro raccolta possono essere ripiantati e svilupparsi velocemente.

Micello



Figura 1.4: Pannello isolante in micello

È un nuovo tipo di materiale a base biologica che viene ricavato attraverso coltivazione dei funghi. Consiste nell'apparato vegetativo del fungo stesso ed è formato da un intreccio di filamenti. Una volta applicato all'interno del legno, forma una membrana isolante solida e molto fitta che si auto genera e cresce fino a riempire completamente l'intercapedine. Questo strato impiega circa un mese a seccare e diventa una schiuma densa, molto adesiva e facilmente plasmabile alla fine di tutto il processo. Può essere utilizzato come matrice da accoppiare ad altri materiali andando a creare dei compositi, ma viene anche impiegato per le sue ottime proprietà isolanti. Data la sua struttura spumosa, viene utilizzato per sostituire le schiume chimiche presenti sul mercato (EPS, EPE). [11]

Canapa



Figura 1.5: Pannello isolante in canapa

È un materiale con ottime proprietà termiche, che può essere facilmente utilizzato come elemento di tamponamento e che viene spesso accoppiato ad altri materiali per la realizzazione di compositi. Il cemento di canapa, per esempio, oltre ad essere uno dei bio-based material con la crescita più rapida, viene spesso impiegato nel mondo delle costruzioni per la realizzazione delle partizioni degli edifici. È formato dall'unione di canapa, acqua e calce e, oltre ad avere delle buone proprietà meccaniche, pesa un ottavo rispetto al calcestruzzo tradizionale. La canapa presenta inoltre delle ottime capacità di resistenza al fuoco di isolamento termico e, a differenza della maggior parte dei materiali analizzati, è resistente alla muffa. La pianta cresce in differenti condizioni climatiche e, anche se ad oggi le limitazioni legislative non ne facilitano la coltivazione, è un materiale con grandi potenzialità nell'edilizia sostenibile.

Fibra di lino



Figura 1.6: Isolante in fibra di lino

La fibra di lino è un materiale a base biologica con una buona elasticità e con delle ottime proprietà di isolamento termico e acustico. I pannelli isolanti in lino sono costituiti dai trucioli del gambo della pianta fusi insieme a una resina artificiale e vengono utilizzati principalmente in ambienti asciutti come intercapedini di partizioni interne, porte tagliafuoco e anime. Oltre ad esser impiegati in pannelli isolanti, le fibre di lino vengono impiegate come additivi per creare dei compositi cementizi.

Sughero



Figura 1.7: Pannello isolante in canapa

Il sughero è un prodotto ecologico e naturale che viene già impiegato nella bioedilizia come isolante termo-acustico e viene applicato in intercapedini, come cappotto interno ed esterno, in sottotetti e sottopavimenti. Viene preferito a molti isolati presenti sul mercato in quanto risulta impermeabile, molto stabile, atossico e con una bassa possibilità di combustione. La sua conformazione composta di piccole cellule ripiene d'aria, unite tra loro da un collante naturale, è ciò che gli conferisce elevate prestazioni di isolamento termico ma soprattutto acustico. L'unico principale problema di utilizzo del sughero nell'edilizia è il costo del materiale, che risulta piuttosto alto a causa della scarsa quantità di circolazione e ai costi elevati di installazione. [12]

Perlite e vermiculite espanse



Figura 1.8: Perlite e vermiculite sotto forma di minerale

È un prodotto naturale che viene sottoposto a un trattamento di natura termica ad alte temperature di tipo irreversibile. Da tale processo si ottiene l’espansione di circa venti volte il volume del materiale stesso che, dopo esser sottoposto a vagliatura, diventa un prodotto a granulometria calibrata. Questo materiale possiede delle ottime proprietà termoisolanti e fonoassorbenti, è incombustibile e in caso di incendio non produce fumi tossici. Rispetto a diversi isolanti naturali non è attaccabile da parassiti, non subendo la formazione di muffe al suo interno, e non contiene nessuna sostanza nociva per la salute degli utilizzatori. Il suo impiego è principalmente per coperture, solai, sottotetti e intercapedini. [13]

Fibra di cocco



Figura 1.9: Pannelli isolanti in fibra di cocco

Anche se poco conosciuta, la fibra di cocco è un buon isolante termico ma soprattutto un ottimo isolante acustico che viene utilizzato principalmente nella costruzione di pavimenti galleggianti e di pareti interne. È un materiale che viene ricavato dalla stratto esterno della noce di cocco e che, prima di poter essere utilizzata, deve essere lasciata per almeno dieci mesi a macerare e per poi esser essiccata e trattata per far sì che non possa poi essere attaccata da parassiti. Una volta in opera risulta essere un materiale traspirante e permeabile al vapore, immarcescibile se soggetto a presenza di umidità e con ottima resistenza al fuoco.

Fibra di juta



Figura 1.10: Isolante in fibra di juta

È un materiale naturale coltivato e utilizzato principalmente nei paesi dell'Asia sud-orientale. Viene ricavato dalla macerazione in acqua degli steli della pianta di juta e dalla successiva estrazione delle fibre dalla parte legnosa. Si trova principalmente sotto forma di feltri e viene utilizzata per le sue buone capacità di isolamento acustico nei pavimenti, nelle partizioni interne e nei controsoffitti. È un materiale traspirante, igroscopico e che, dopo il trattamento iniziale risulta inattaccabile dai parassiti. [14]

Fibra di kenaf



Figura 1.11: Isolante in fibra di kenaf

La fibra di Kenaf viene ricavata a seguito dell'essiccazione delle piante nei campi che, dopo aver perso la loro linfa, vengono tagliate e raccolte sotto forma di steli, e successivamente sottoposte a un processo di separazione tra fibre e altri componenti. Nel mondo delle costruzioni questo materiale può essere utilizzato sia in pannelli rigidi che attraverso feltri più flessibili. Come diversi dei materiali analizzati fin ora, la fibra di kenaf viene impiegata

per le sue eccellenti proprietà isolanti, termiche e acustiche, accoppiate a una buona traspirabilità che mantiene un ambiente salubre. In base alle sue caratteristiche fisiche può essere impiegato come cappotto interno o esterno e come isolante nelle intercapedini di strutture in legno, se applicato in pannelli rigidi, o come isolamento dai rumori di calpestio se sottoforma di feltro.

Fibra di mais



Figura 1.12: Pannelli isolanti in fibra di mais

È ricavato dai chicchi di mais attraverso un particolare processo che, dopo aver generato le fibre, le lega insieme con l'utilizzo del calore, arrivando a creare il prodotto finale in pannelli con spessore e densità variabile. Ha una buona resistenza al fuoco in caso di incendio e, oltre a emettere basse quantità di fumo, ha la capacità di auto estinguersi. Grazie alle sue proprietà di isolante termoacustico traspirante, la fibra di mais viene impiegata come riempimento di pareti, coperture, solai e strutture in legno, ma può anche essere applicato come un vero e proprio cappotto. [15]

Lana di pecora



Figura 1.13: Isolante in lana di pecora

Già piuttosto conosciuta nel mondo delle costruzioni, la lana di pecora è un materiale traspirante che grazie alla sua igroscopicità può assorbire umidità fino ad arrivare al 33% del suo peso e, successivamente, riesce a rilasciarla senza perdere le sue proprietà isolanti. È un materiale di origine naturale e, se sottoposto a adeguati trattamenti, anche riciclabile, che si ottiene dalla tosatura che annualmente deve essere praticata sul pelo dell'animale. Viene tagliata e lavata con appositi prodotti a base di carbonato di sodio per rimuovere il grasso, per poi essere appositamente trattata fino ad ottenere dei veri e propri pannelli. È impiegata per le sue buone caratteristiche fono e termoisolanti che possono garantire un confort ottimale anche nelle stagioni più calde. [16]

1.4 La disponibilità di terra coltivabile

I materiali a base biologica presentano molti vantaggi, come la diponibilità in loco, la conseguente riduzione dei trasporti per la produzione e l'approvvigionamento, l'assorbimento di carbonio durante la loro crescita e la sostenibilità lungo tutto il loro ciclo di vita.

Per comprendere maggiormente l'accessibilità a questi prodotti è però necessario valutare la loro disponibilità in natura e l'offerta presente nei mercati attuali. È importante studiare la potenzialità dei terreni coltivabili per comprendere la reale fattibilità di una completa ristrutturazione del patrimonio edilizio su larga scala attraverso materiali biologici, analizzando le possibili concorrenze sull'uso del suolo dei diversi settori causate dall'attuazione di questa strategia.

I Biobased material come la paglia vengono impiegati nel mondo delle costruzioni con l'obiettivo di raggiungere una vita utile corrispondente a quella dell'edificio stesso, ovvero di circa cento anni. Durante il loro utilizzo, il carbonio assorbito nel periodo di crescita delle piante viene trattenuto all'interno dell'edificio. Infatti, tutto il carbonio immagazzinato

all'interno del prodotto viene rilasciato nell'atmosfera sotto forma di CO₂ alla fine della vita del materiale e, per questo motivo, per i prodotti a base biologica il ciclo del carbonio è considerato neutro. I materiali biogenici con una crescita rapida possono quindi offrire una strategia promettente per raggiungere gli obiettivi indicati nei capitoli precedenti.

Oltre alle differenti proprietà termiche e strutturali dei materiali tradizionali, per i materiali da costruzione a base biologica varia il tipo di lavorazioni da svolgere per renderli pronti all'uso e soprattutto il quantitativo di materia prima presente in natura. La loro produzione è strettamente legata a dalla gestione agricola e forestale della terra, a causa della concorrenza che si instaura tra differenti settori che necessitano della coltivazione dei campi per ottenere la materia prima. Fare affidamento all'uso intensivo di materiali biologici nell'edilizia può quindi condurre verso un'importante riduzione delle emissioni gas serra solo se vengono garantite un'agricoltura e una gestione forestale sostenibile. [17]

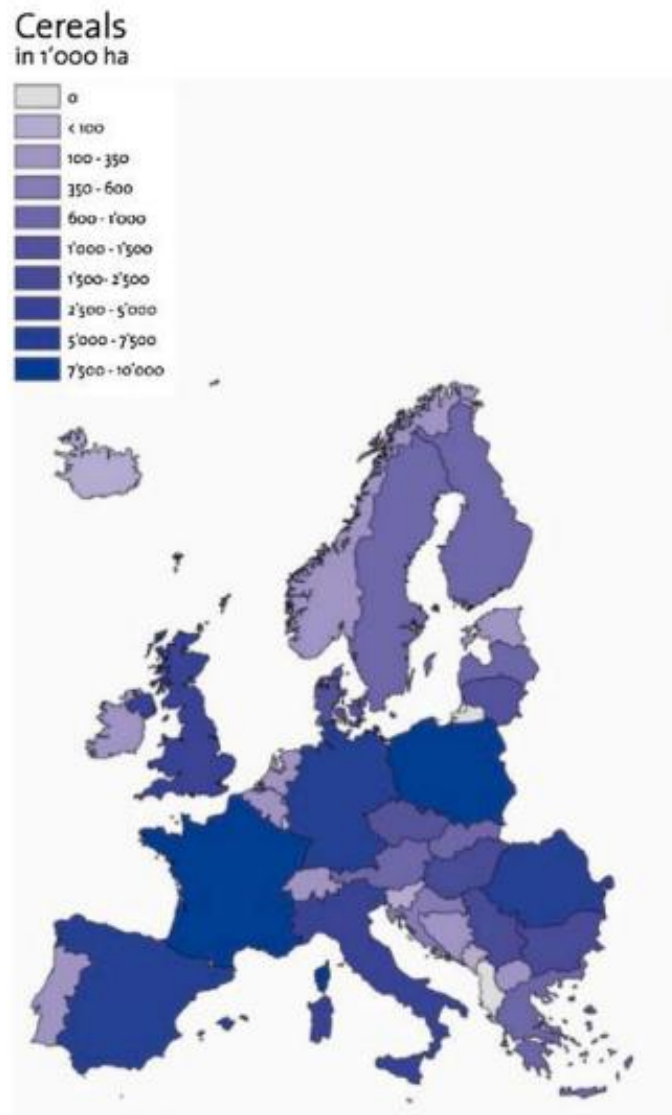


Figura 1.14: Terreni esistenti per la coltivazione, la raccolta e la produzione di cereali (Eurostat 2017)

Come è possibile osservare nella figura 1.14, ricavata da Eurostat 2017, l'area utilizzata per la coltivazione di cereali è già piuttosto vasta. Anche se il seme/frutto viene sempre utilizzato, la maggior parte della paglia prodotta, dopo la raccolta viene invece lasciata sul campo per garantire i nutrienti necessari alla rigenerazione del suolo, oppure raccolta e riutilizzata come lettiera e mangime per gli animali.

Questa ampia disponibilità di materiale non utilizzato e già presente sul mercato, porta a considerare la paglia come una delle soluzioni più realistiche tra i differenti Bio-Based material. La figura 1.15 mostra la domanda e l'offerta annua di alcuni dei materiali sostenibili che si stanno studiando per sviluppare un'edilizia sostenibile: in alto a sinistra è rappresentato il grafico della paglia, in alto a destra quello del legno, in basso a sinistra è rappresentato il grafico della canapa e in basso a destra la canapa. [18]

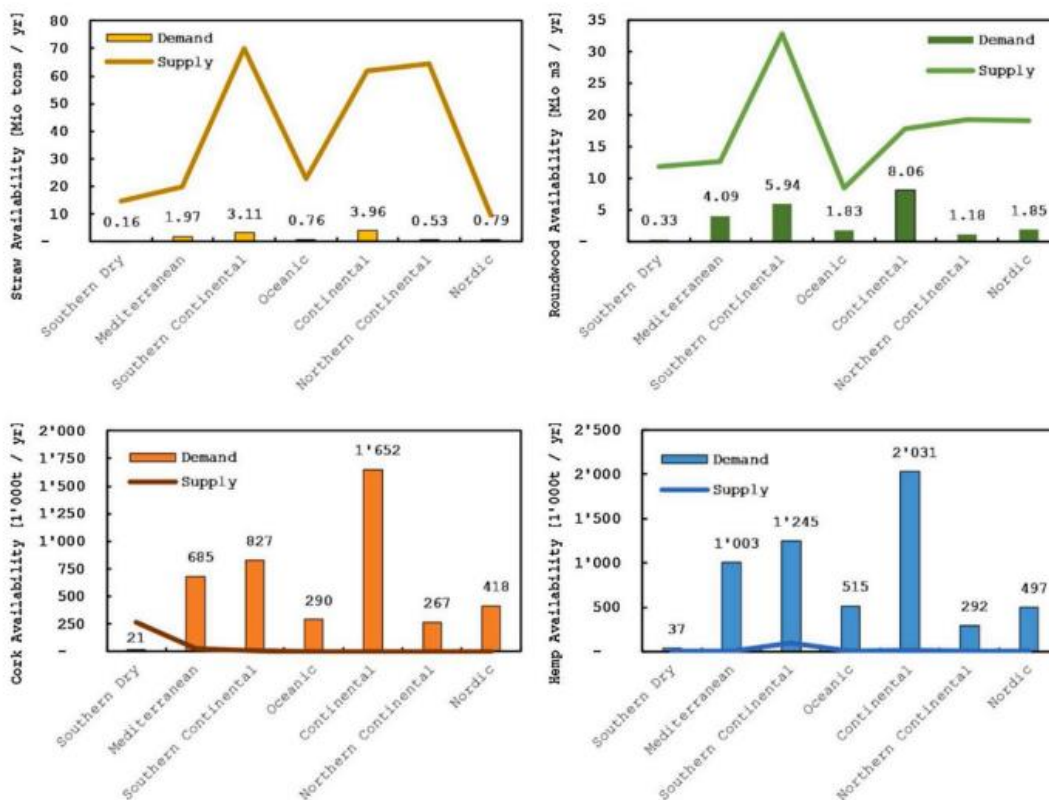


Figura 1.15: Domanda e offerta di paglia, legname, sughero e canapa nel mondo

Tutti i 28 stati membri del UE hanno una produzione di paglia molto maggiore rispetto alla domanda di paglia utilizzabile nel mondo delle costruzioni; alcuni degli altri materiali, come sughero e canapa, non riescono invece a soddisfare quasi nessuna domanda. Questo, inoltre, conferma che il terreno attualmente utilizzato per la coltivazione di paglia risulta essere più che sufficiente per garantire la produzione necessaria a soddisfare l'intera domanda proveniente dal mondo delle costruzioni senza portare a particolari conflitti con altri settori. In particolare, in Europa il settore edile richiede soltanto il 12% del terreno che ad oggi è considerato disponibile per le costruzioni. [19]

La paglia risulta essere il materiale alternativo da costruzione più sicuro e promettente, in quanto presenta diversi vantaggi rispetto ai materiali indicati precedentemente. Per prima cosa non si andrebbero a sacrificare nuovi terreni, infatti, la sua produzione è già presente nella maggior parte dei paesi e non sarebbe necessario alcun cambiamento nell'utilizzo del suolo. Essa è un sottoprodotto agricolo della produzione del grano, non viene considerata e utilizzata come materia prima se non per una piccola parte sfruttata come combustibile domestico, mangime per animali o convertita in carta. La sua produzione è in continua crescita per la maggior richiesta di grano, di conseguenza anche la percentuale disponibile sarà sempre maggiore. Per quanto resti insieme al legno il materiale più disponibile e con il potenziale maggiore, la maggior differenza tra i due è il periodo di rotazione; se un albero necessita di un certo quantitativo di anni per raggiungere il corretto stato di utilizzo, la paglia ha il vantaggio di provenire da una pianta con una crescita piuttosto rapida, con un periodo di rotazione di 1 anno o anche meno.

Essendo un materiale spesso inutilizzato, attraverso un utilizzo costante e significativo nel mondo delle costruzioni, la paglia diventerebbe un materiale sempre più richiesto, fornendo un valore economico aggiuntivo per gli agricoltori.

1.5 La paglia nel mondo delle costruzioni

1.5.1 I primi utilizzi nell'edilizia

Per quanto poco conosciuta, la paglia è già stato un materiale innovativo nel mondo dell'edilizia. Le costruzioni in balle di paglia sono state sviluppate per la prima volta alla fine del 1800 negli Stati Uniti, più precisamente in Nebraska, dai coloni europei, che avevano necessità di costruirsi un rifugio. Anche se inizialmente scelta come soluzione temporanea a causa della poca disponibilità di altri materiali da costruzione come pietre e legname, grazie alle sue caratteristiche termiche e strutturali è stata mantenuta e migliorata negli anni successivi. [20]

Tutto l'interesse ottenuto negli anni dalla paglia come materiale da costruzione è diminuito all'inizio del XX secolo, periodo in cui, grazie al grande sviluppo nel settore dei trasporti, i materiali da costruzione prodotti industrialmente sono diventati facilmente reperibili. [21] All'inizio degli anni '80 e ancor di più a metà degli anni 90', negli Stati Uniti e nel Regno Unito si è però ritornati a utilizzarla nel mondo dell'edilizia. Questa inaspettata rinascita si è sviluppata quando i costruttori ne hanno studiato maggiormente le proprietà, ottenendo riscontri molto positivi. La paglia è infatti un materiale naturale, rinnovabile e biodegradabile, che viene già coltivato in molte aree, risultando quindi facilmente reperibile, e che richiede poche lavorazioni da quando viene raccolto a quando viene messo in opera. Avendo un basso contenuto di carbonio incorporato è un materiale che si presta all'edilizia sostenibile e che può aiutare a ridurre l'impatto ambientale delle nuove infrastrutture edilizie.

Quando nel 1800 venivano costruite in Nebraska abitazioni in paglia, erano costruite attraverso pareti portanti che sfruttavano l'utilizzo di perni inseriti nelle balle per ottenere una migliore stabilità. Negli anni successivi, per quanto questo metodo sia stato sempre

utilizzato e migliorato, si è iniziato a edificare infrastrutture con una struttura portante in legno con riempimento in balle di paglia.

Inizialmente, le dimensioni dei blocchi utilizzati per le strutture in paglia erano limitate dalla raccolta e dal trasporto manuale della materia prima. Con l'avvento delle macchine imballatrici, grazie alla loro capacità di compattare la paglia, si è iniziato a ridurre il volume, rendendone più semplici il trasporto e lo stoccaggio. [22] Nacquero in questo modo le "balle" di paglia, a forma prismatica, e le "rotoballe" a forma cilindrica. Nel corso del tempo le loro dimensioni sono notevolmente variate, in base all'utilizzo e alla disponibilità di macchinari, ma attualmente è possibile definire i seguenti formati standard:

	Altezza (cm)	Larghezza (cm)	Lunghezza (cm)	Densità (kg/m ³)
<i>Piccole</i>	35	50	50 < x < 120	80 < x < 120
<i>Medie</i>	50	80	80 < x < 220	n.d.
<i>Jumbo</i>	70	120	100 < x < 280	180 < x < 200

Tabella 1.2: Requisiti edifici NZEB

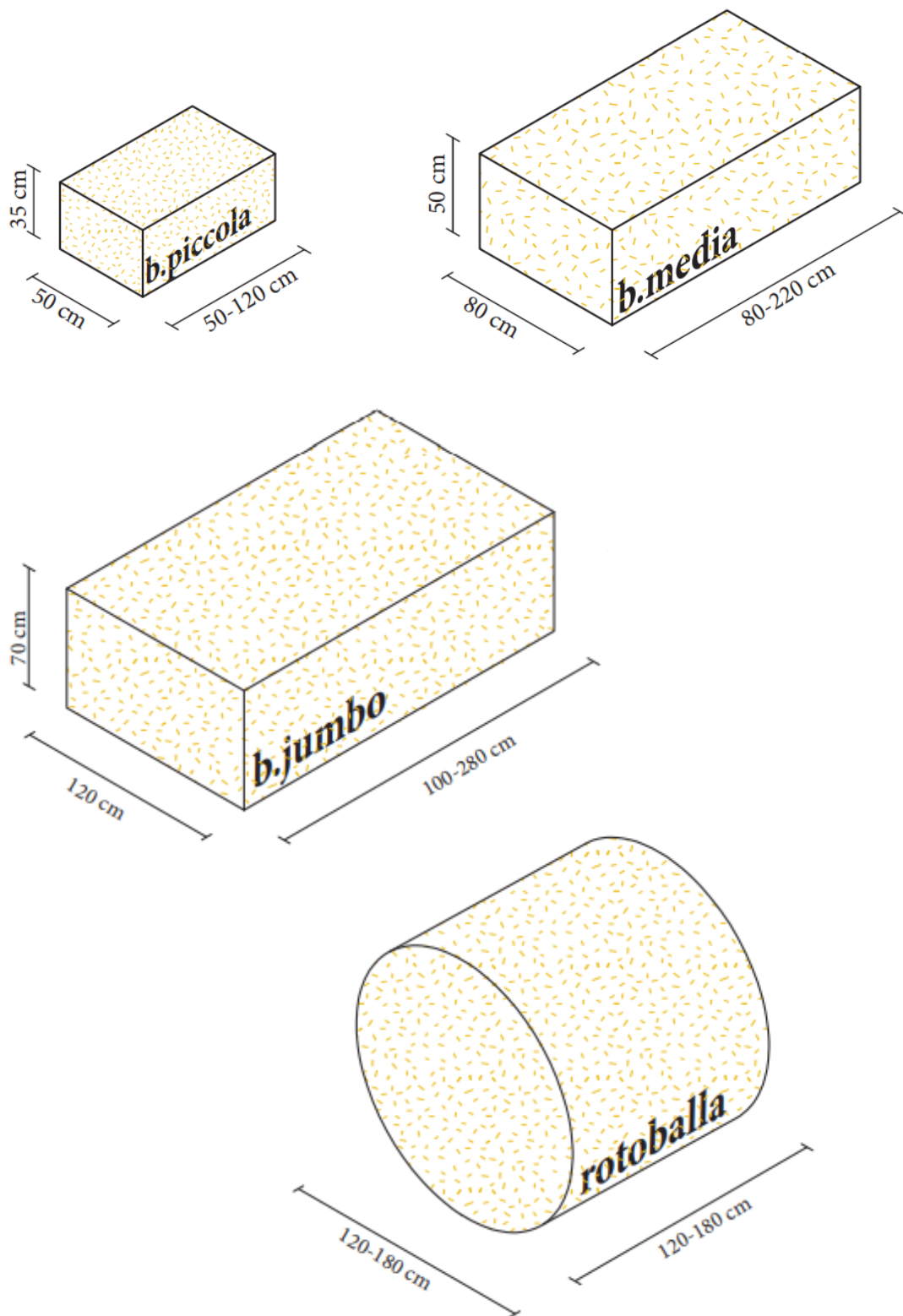


Figura 1.16: Differenti formati standard di balle di paglia presenti sul mercato

1.5.2 I primi utilizzi nell'edilizia

Per utilizzare un approccio sostenibile riducendo il più possibile l'impatto sul clima, è importante limitare il dispendio di energia e azzerare le emissioni di gas serra (GHG). Per fare questo nel mondo dell'edilizia è indispensabile scegliere materiali da costruzione che, oltre a garantire le prestazioni richieste, siano in grado di generare il minor inquinamento ambientale possibile. La paglia può essere considerata un'alternativa valida ai materiali tradizionali e rientra nell'insieme di quelli adatti alla bioedilizia. [23]

Questo materiale di origine naturale viene utilizzato in differenti settori, come per la produzione di cappelli, borse, imbottiture di sedie e selle, ma è nel mondo dell'edilizia che viene impiegato un quantitativo più consistente. Tra gli esempi più frequenti troviamo il suo utilizzo in copertura e in facciata, attraverso l'applicazione di mattoni di sola paglia o paglia mista ad argilla e di strati di coibentazione all'interno di strutture lignee.

Per quanto questi esistano e vengano impiegate queste soluzioni sostenibili nel mondo dell'edilizia, il 90% dei materiali utilizzati per l'isolamento termoacustico sono prodotti sintetici, la cui produzione, oltre a richiedere grandi quantitativi di energia e risorse non rinnovabili, generano significative emissioni di gas serra. [24]

Rispetto a tutti questi materiali, le balle di paglia, applicate al mondo dell'edilizia, possono generare grandi vantaggi sia in termini di costi, che per quanto riguarda la salute umana e la sostenibilità ambientale. Dopo studi e ricerche approfondite si è ormai arrivati alla conclusione che, come materiale da costruzione, la paglia è un ottimo materiale isolante che può garantire un comfort abitativo elevato e che deve essere impiegato sempre più frequentemente nell'edilizia moderna. Essendo soggetta a problemi di formazione di muffe e decomposizione, oltre ad un controllo e una manutenzione costante, per far lavorare al meglio questo materiale è necessario che sia asciutto e che durante la sua vita in opera non arrivi a un contenuto di umidità superiore al 20%. [25] Esistono già sistemi moderni in grado di controllare le condizioni delle balle in opera, tuttavia, è necessario approfondire soluzioni tecniche che permettano di mantenere le loro condizioni ideali per il tempo necessario a garantirne le stesse prestazioni durante tutta la vita utile. Essendo un materiale di origine naturale, le balle di paglia possono variare le loro prestazioni in base a molti fattori difficilmente controllabili; l'orientamento degli steli, il luogo di coltivazione, le condizioni di trasporto, la modalità di stoccaggio e imballamento e la posa in opera possono modificarne le proprietà e incidere sulle loro capacità in opera. Anche per questo motivo, gli studi su questo materiale sono sempre stati complicati dalla difficoltà di scelta dei parametri effettivi da utilizzare al loro interno; le caratteristiche della paglia variano anche solo fra un esemplare e un altro, e non possono essere applicate in ogni circostanza. Nei prossimi capitoli verranno illustrate in modo più dettagliato le singole proprietà di questo materiale, evidenziando gli intervalli, fra cui esse possono variare, anche in base ciò che è stato indicato precedentemente. [26]

2 La paglia e la sua applicazione nel settore edile

2.1 Struttura della paglia e tipologie

Quando si prende in considerazione la paglia è importante differenziarla dal materiale a cui spesso si associa, ovvero il fieno. Quest'ultimo può essere definito come erba essiccata raccolta in balle, pressata e utilizzata come mangime per animali da allevamento, mentre la paglia è il prodotto di scarto ottenuto dalla coltivazione di cereali e viene raccolto successivamente alla maturazione e alla trebbiatura, ovvero il momento in cui la spiga e la granella vengono rimosse dalla pianta stessa. Le ottime proprietà riscontrate in questo materiale sono principalmente dovute alla sua composizione chimica, che risulta essere molto simile a quella del legno: è composta per il 40-50% da cellulosa, per il 20-30% da lignina e per il 20% da emicellulosa. Data la vastissima produzione di questo materiale sulla terra, esso rappresenta una risorsa sostenibile.

Vengono elencati di seguito i differenti cereali da cui viene ricavata la paglia:

- **Riso:** Impiega 150 milioni di ettari del nostro pianeta e viene coltivato principalmente in zone con climi tropicali, caldi e molto umidi. Ha uno stelo con lunghezza che varia tra i 30 e 50 cm. In Italia la concentrazione maggiore delle coltivazioni di riso si trova a Nord, nella pianura padana. La paglia che si ottiene dalla coltivazione del riso risulta essere quella più adatta nel mondo delle costruzioni grazie all'alto contenuto di Silice, che si aggira attorno al 20% del volume totale. Oltre a renderla inadatta per il nutrimento degli animali, la percentuale così alta di Silice comporta anche un miglior comportamento alla decomposizione, rendendo questa tipologia di paglia più resistente e duratura. Grazie alla presenza di particolari peli sulla superficie esterna dello stelo, le balle in paglia di riso risultano più coese e garantiscono un attrito maggiore nel caso di utilizzo come aggregati di malte cementizie.
- **Avena:** La coltivazione di questo cereale è situata principalmente in America settentrionale e in diverse Nazioni Europee. Nella penisola italiana è poco presente, Calabria, Trentino-Alto Adige, Toscana e Lombardia sono le uniche regioni in cui viene ancora coltivata. Ha uno stelo con lunghezza che varia tra i 60 e 150 cm.
- **Fumento:** Viene suddiviso in grano tenero e grano duro. Quest'ultimo è poco presente rispetto al grano tenero, il quale viene coltivato in tutti i Paesi a clima temperato (Asia, Europa e Africa) e che negli ultimi anni ha preso piede anche nelle Americhe e in Australia. Anche in Italia risulta molto presente, principalmente nelle

seguenti regioni: Lombardia, Piemonte, Toscana, Marche, Emilia-Romagna, Puglia e Sicilia. La lunghezza del fusto e di dimensioni medie e varia tra gli 80 e 90 cm di lunghezza.

- **Orzo:** Viene coltivato al posto del frumento in gran parte del globo grazie alla sua peculiarità di riuscire a crescere anche in climi freddi. Si trova principalmente in Nord America, Cina, India Turchia, Marocco e in parte anche in Europa. Presenta uno stelo di lunghezza variabile che può andare dai 15 ai 120 cm.
- **Segale:** Rispetto agli altri cereali si coltiva nei Paesi con climi piuttosto freddi, come Russia, Canada, Norvegia, Polonia, Stati Uniti, Germania e Giappone. Un'altra particolarità della paglia ricavata dalla segale è la lunghezza dello stelo, che può anche superare i 150 cm

Se analizziamo nel dettaglio una pianta di cereali, possiamo suddividerla in radici, utilizzate per raccogliere l'acqua e i minerali presenti nel terreno, stelo, la parte a forma tubolare e cava all'interno dove si trovano i nodi e gli internodi da cui nascono le foglie, e la testa. È proprio questa cavità piena d'aria all'interno dello stelo che attribuisce ottime qualità isolanti a questo materiale. [27]

2.2 Differenti metodi di costruzione

Dalla fine del 1800 ad oggi le costruzioni in paglia sono diventate più numerose su tutto il territorio mondiale. Per quanto negli ultimi anni si stia iniziando ad applicare anche a edifici urbani, questa tecnica costruttiva è stata utilizzata per strutture situate in zone agricole, con bassa densità edilizia e quindi al di fuori del contesto urbano. La voglia di integrare questa tecnologia anche nelle grandi città e di provare svilupparla per renderla più avvicinabile anche dal punto di vista normativo, mostra una maggior sensibilità verso il tema della sostenibilità ambientale. Ciò è motivato dalle ottime prestazioni del materiale, dal suo basso costo e dalla sua capacità di non emettere e trattenere la CO₂. Nel corso del tempo sono stati sviluppati differenti metodi di costruzione per le strutture in paglia, inizialmente per la costruzione di nuovi edifici mentre, più recentemente, per interventi di riqualificazione. Per quanto possano risultare differenti, sono tutti accomunati dalla stessa necessità di proteggere il materiale dalla bagnatura diretta e dall'infiltrazione di umidità, considerati causa principale di degrado e formazione di muffe nel materiale e conseguente limitata durabilità. Per comprenderne le differenze, si ripotano di seguito le diverse possibili applicazioni.

2.2.1 I primi utilizzi nell'edilizia

È il metodo costruttivo più antico, lo stesso utilizzato non appena vennero inventate le macchine imballatrici, ma applicato tutt'oggi in alcuni paesi del Nord Europa. La paglia viene utilizzata in grandi blocchi rettangolari, posizionati uno sopra l'altro a giunti sfalsati e tenuti insieme attraverso elementi verticali di dimensioni ridotte. Con questa metodologia costruttiva essa sviluppa sia funzione strutturale che isolante. Per quanto ancora utilizzata,

questa tipologia costruttiva presenta alcuni problemi, causati principalmente dal peso della copertura in relazione al numero e al tipo di aperture presenti nelle partizioni verticali. Data la possibile differenza di densità delle paglie applicabili, il peso della copertura genera una compressione più o meno grande che, con la presenza dei vani per porte e finestre, porta a una maggior concentrazione dei pesi nelle aree contigue ad esse, generando quindi problemi. Questo sistema, chiamato anche “Metodo Nebraska”, presenta altri limiti costruttivi:

- Il fabbricato deve avere dimensioni piuttosto ridotte; l'altezza dell'edificio è infatti limitata dalla dimensione delle pareti: deve rispettare il rapporto di 5:1.
- Durante le fasi di trasporto, stoccaggio e costruzione, la paglia deve rimanere asciutta. Ciò deve essere rispettato almeno fino alla stesura dell'intonaco, quindi, risulta complicato per edifici di grandi dimensioni.
- A causa dei problemi di distribuzione dei pesi, la percentuale di aperture presenti sul muro deve essere minore del 50%.
- Questa tecnologia deve essere accoppiata a coperture piuttosto leggere.
- Sono necessari fino a tre mesi di tempo prima che le balle di paglia raggiungano la compressione totale sotto il peso della copertura.

Seppur vincolato dai limiti elencati, questa tipologia costruttiva presenta anche diversi vantaggi:

- L'assenza di una vera e propria struttura comporta una riduzione sostanziale dei ponti termici negli edifici.
- La struttura portante in paglia garantisce un utilizzo minimo di legname.
- Il metodo costruttivo è semplice e accessibile, soprattutto per autocostruttori, e garantisce tempi di edificazione brevi.
- I carichi sono distribuiti in modo uniforme
- La progettazione risulta facile e adatta anche ai meno esperti
- Permette di realizzare forme curve e circolari, permettendo una buona versatilità.

Anche se il metodo Nebraska può essere considerato ormai consolidato e presenti diversi vantaggi, le *Norme Tecniche per le Costruzioni* non considerano la paglia come materiale con finalità costruttive, dal 2008 infatti questo metodo costruttivo non può essere applicato in Italia.

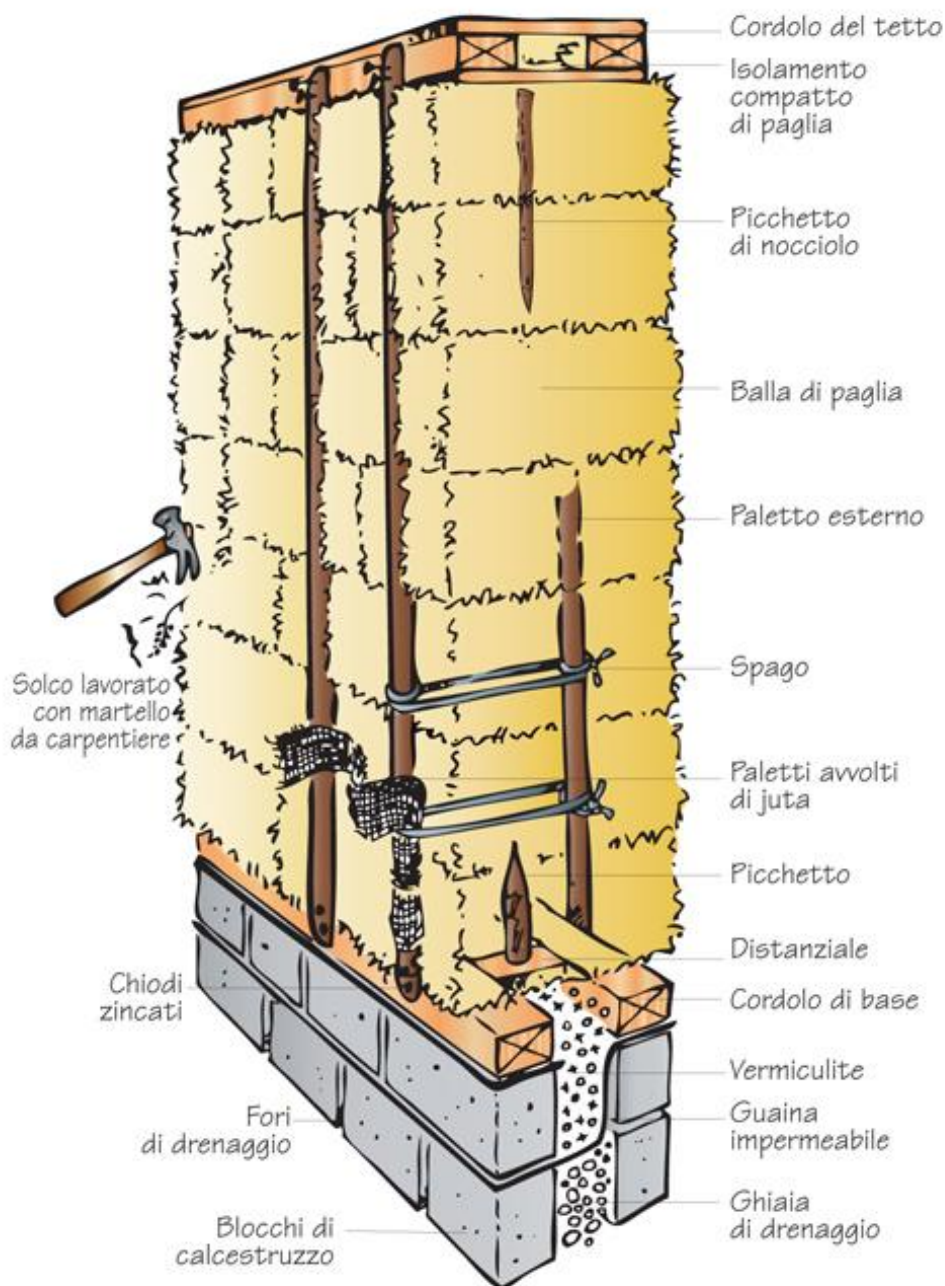


Figura 2.1: Metodo Nebraska

Durante la costruzione delle partizioni verticali delle strutture edificate con il sistema a balle di paglia portanti è indispensabile rispettare una distanza minima orizzontale tra il termine della balla superiore e quello della balla sottostante. Per garantire la corretta stabilità è infatti necessario mantenere uno sfasamento maggiore di 30 cm e realizzare un collegamento verticale che impedisca lo scorrimento di una balla rispetto all'altra. Prima del posizionamento del corso di paglie di base, vengono annegati nelle fondazioni dei tondini in

acciaio, legno o bambù a cui viene poi fissata la prima fila di elementi. Vengono poi via via sovrapposti quelli successivi, mantenendo il fissaggio verticale con almeno due elementi per balla. Per quanto applicabile ad ogni tipologia di balla, questo sistema predilige l'utilizzo di elementi di piccole dimensioni, che garantiscono un buon isolamento mantenendo facilità di trasporto e velocità di messa in opera. [28]

Una volta completata la sovrapposizione di tutte le balle della partizione verticale viene posizionato superiormente un cordolo in legno, in modo da garantire una distribuzione uniforme di tutto il peso della copertura. Data la forma simile a quella di una scala, questi elementi in legno vengono chiamati "cordoli scalettati", e ricoprono tutte le partizioni verticali della struttura. Seppur poco utilizzato, nei casi in cui il corso finale di balle risultasse irregolare a causa di paglia di scarsa qualità, è anche possibile applicare un cordolo in calcestruzzo.

Il collegamento delle fondazioni e del cordolo superiore è di fondamentale importanza nel sistema a balle di paglia portanti, in quanto garantisce alla copertura di resistere all'effetto delle forze generate da vento e sisma. Questa connessione velocizza inoltre la compressione della paglia sotto il peso del tetto o dei solai superiori, processo indispensabile prima della stesura finale dell'intonaco. Il collegamento tra fondazioni e primo corso di balle può avvenire attraverso l'utilizzo di barre filettate, fissate inferiormente e attorno alle quali vengono fatte poi passare le balle superiori, fino ad arrivare alla copertura. Un metodo alternativo consiste invece nel fissaggio di funi metalliche o cinghie di polistirene attorno ai blocchi di paglia, vincolate inferiormente ai due lati delle fondazioni e fatte passare superiormente al cordolo.

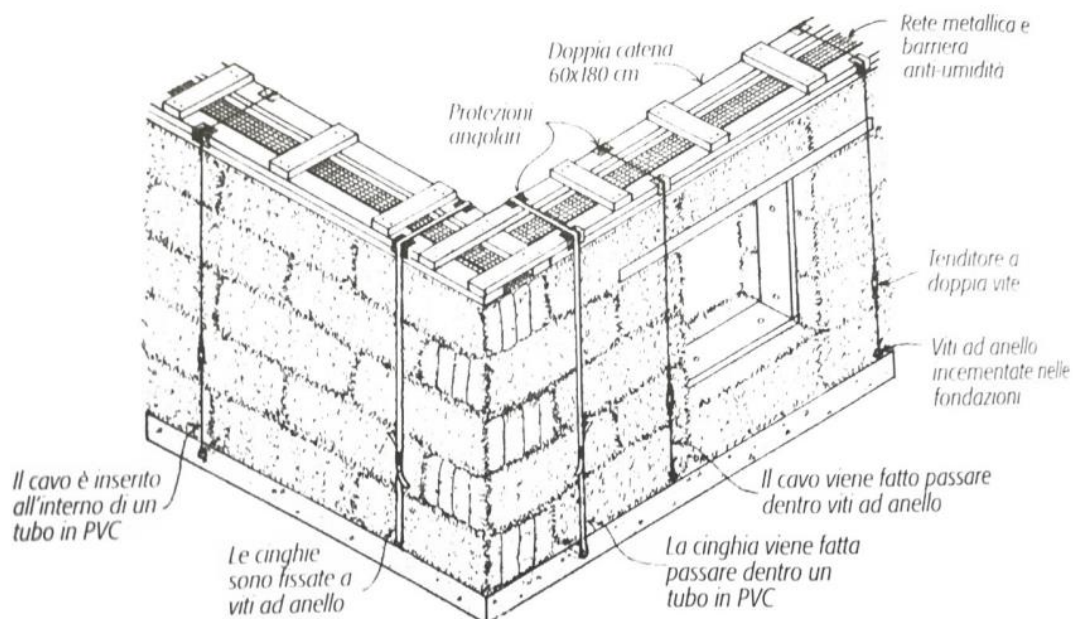


Figura 2.2: Muro in paglia precompresso attraverso cinghie di polistirene e cavi

Il carico della copertura, distribuito in modo uniforme dal cordolo superiore, ha un'influenza diretta sul posizionamento di porte e finestre all'interno delle partizioni verticali. La distribuzione dei pesi avviene attraverso l'utilizzo di architravi in legno o acciaio posizionate superiormente al controlaio dei serramenti, che caricano le balle laterali in modo maggiore rispetto alle altre. Questo incremento di carico comporta una compressione maggiore di una sola parte di elementi, che potrebbero portare a differenti assestamenti tra la zona compressa e quelle circostanti, causando fessurazioni nell'intonaco e spostamenti della copertura. Per questo motivo è bene limitare il numero di elementi vetrati e ridurne quanto più possibile le dimensioni. Per ovviare a questo problema generato dagli architravi, vengono anche utilizzati dei telai strutturali in travi scatolari dello stesso spessore della parete che sopportano i carichi sovrastanti e li scaricano in modo uniforme sulle balle sottostanti.

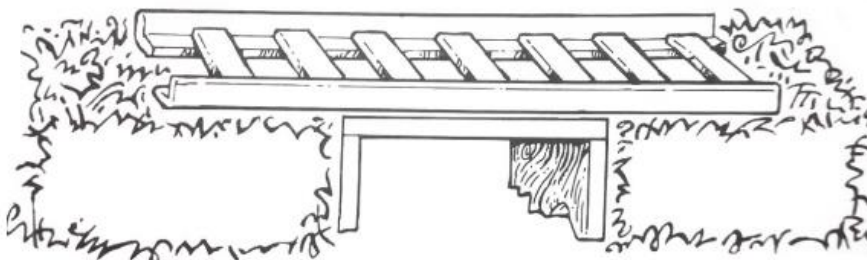


Figura 2.3: Muro in paglia precompresso attraverso cinghie di polistirene e cavi

2.2.2 Sistema a balle di paglia non portanti

I sistemi a balle di paglia non portanti si sono sviluppati col passare del tempo e sono diventati oggi i più utilizzati nel mondo dell'edilizia. Supportati da apposite normative, vengono considerati un metodo costruttivo consolidato e facilmente applicabile agli edifici più moderni.

Rispetto al sistema a balle portanti, in questa tecnologia costruttiva la paglia è a tutti gli effetti tamponamento e isolante termico. Viene disposta all'interno di una vera e propria struttura, orizzontale e verticale, generalmente in legno, che svolge il ruolo di sostegno strutturale. Grazie ad essa, la necessità di utilizzare balle di grandi dimensioni viene meno, permettendo l'utilizzo di elementi di grandezza ridotta (35x50x50-120 cm). [29]

Seppur innovativo, questo sistema presenta comunque diversi limiti:

- Rispetto al precedente necessita dell'utilizzo di un'importante quantità di legname.
- Il metodo costruttivo non risulta più così semplice e per la costruzione del telaio è necessario l'impiego di una carpenteria specializzata.
- In caso di rivestimento esterno con strato di intonaco, la superficie da rivestire sarà poco omogenea a causa dell'alternarsi di materiale legnoso e paglia.

A fronte di queste problematiche ci sono diversi vantaggi che hanno portato l'edilizia moderna a prediligere questa metodologia costruttiva:

- Le aperture per porte e finestre non hanno più limiti dimensionali e possono essere realizzate con maggiore libertà.
- Le dimensioni della struttura non sono più limitate dalla capacità strutturale della paglia.
- La struttura in legno è più familiare nel settore edile e di conseguenza più facilmente utilizzabile.
- Può essere adottato il metodo di prefabbricazione della struttura per velocizzare i tempi di messa in opera.
- Dopo la realizzazione della struttura portante in legno e successivamente della copertura, garantisce la presenza di un luogo coperto dove stoccare i materiali come la paglia.
- Non si hanno vincoli sul posizionamento delle balle all'interno della struttura (di piatto o di coltello).
- Non avendo un ruolo strutturale è possibile utilizzare balle di paglia con densità inferiori.
- Non ci sono tempi di attesa per la precompressione delle partizioni verticali sotto il peso del tetto come per il metodo Nebraska.

Per i sistemi a balle di paglia non portanti è possibile definire due tipi di tecnologie costruttive:

- Post and Beam
- Infill

2. La paglia e la sua applicazione nel settore edile

Il primo presenta una struttura portante realizzata da travi e pilastri. In questo sistema la grandezza delle balle di paglia definisce la distanza tra gli elementi strutturali, i quali possono essere disposti all'interno del tamponamento, svolgendo anche la funzione di controvento oppure all'esterno, evitando di fatto di entrare in contatto con il controvento. [30]

La scelta del posizionamento dei pilastri portanti è indispensabile per definire le dimensioni dell'edificio in quanto, se la struttura in legno dovesse trovarsi all'interno del tamponamento, la distanza tra i pilastri sarebbe definita dalla dimensione delle balle mentre, se la struttura portante fosse posizionata all'esterno non sarebbe condizionata dal posizionamento degli elementi in paglia. In entrambi i casi è però comunque necessario vincolare le balle alla struttura portante attraverso un processo di legatura. Per quanto riguarda il posizionamento e il fissaggio dei telai di porte e finestre alla struttura portante, esso verrà effettuato prima del riempimento dei tamponamenti con le balle di paglia.

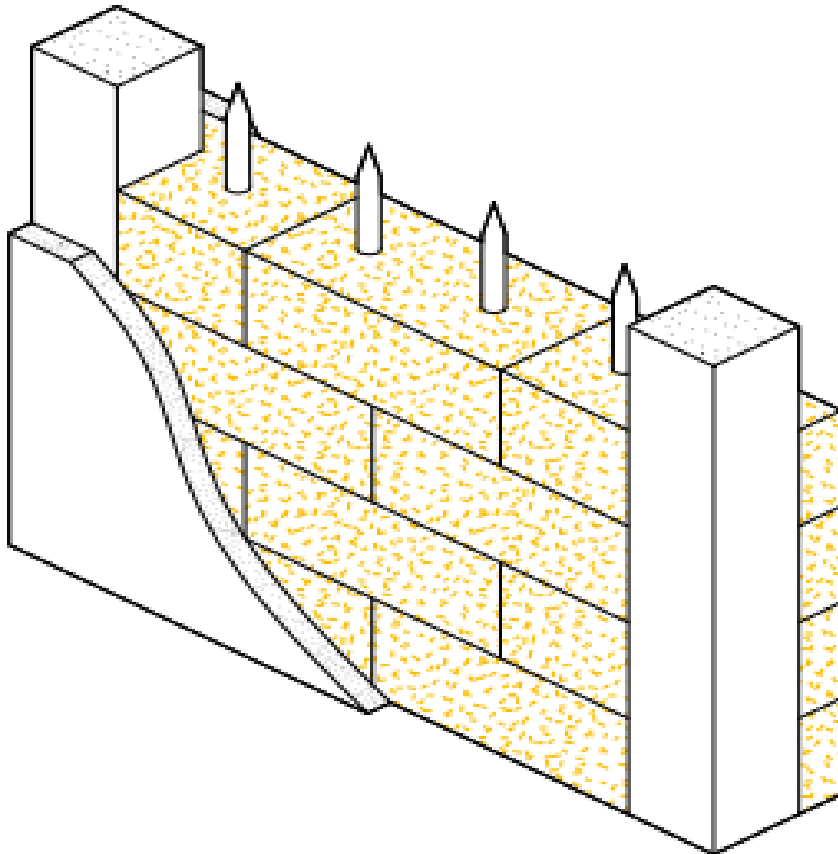


Figura 2.4: Sistema costruttivo Post and Beam

Il sistema Infill presenta invece una struttura composta da montanti verticali ravvicinati in legno. Questi possono essere in elementi a traliccio, ad H, elementi pieni o scatolare. Oltre alle differenti dimensioni, rispetto al sistema Post an Beam presenta vani di porte e finestre costruiti come veri e propri supporti strutturali, posizionati lungo tutto il perimetro dell'edificio. Per quanto la presenza di elementi verticali dello stesso spessore della parete renda più complicata e disomogenea la stesura dell'intonaco, allo stesso tempo rende possibile il fissaggio di differenti elementi di rivestimento.

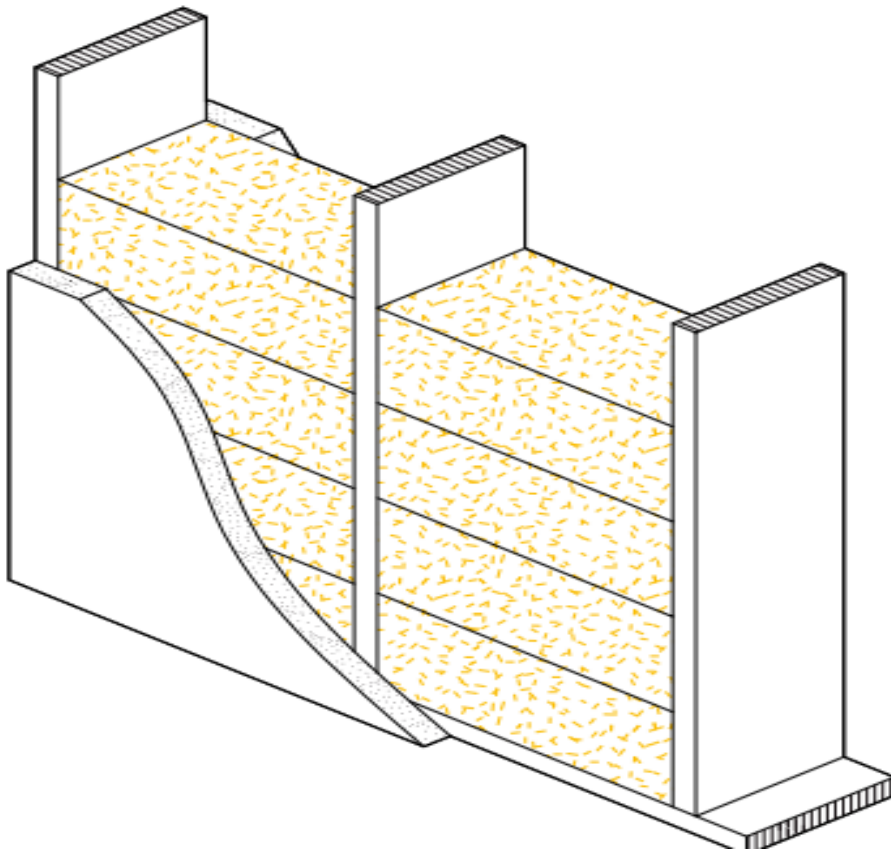


Figura 2.5: Sistema costruttivo Infill

2.2.3 Sistema GREB

Il sistema GREB è una fra le tecniche più innovative, la sua applicazione inizia attorno agli anni '90 in Québec e consiste in un'integrazione di quattro differenti materiali, (legno, paglia, malta e giunti metallici) assemblati insieme. Anche in questa tecnologia è presente una struttura a telaio portante realizzata con materiale legnoso, che ospita il tamponamento in balle di paglia, disposte in questo caso solamente a coltello. A differenza dei sistemi a balle di paglia non portanti, nel sistema GREB è presente anche una controventatura metallica, realizzata con bande in acciaio incrociate e vincolate in entrambi i lati della parete. La disposizione dei montanti in legno, solitamente di dimensioni 4x10 cm, composti da una

doppia struttura di elementi situati nei bordi della partizione verticale, ricordano delle vere e proprie casseforme, all'interno delle quali vengono poi posizionate le balle di paglia. Infatti, durante la fase di costruzione, dopo aver posizionato ogni fila di balle all'interno della struttura a telaio, vengono fissate le cassetture e viene infine riempito di malta GREB lo spazio presente tra la paglia e i casseri. La malta GREB, materiale da cui prende il nome questo metodo costruttivo, viene realizzata mescolando insieme calce, segatura, sabbia e una piccola parte di cemento e, oltre a garantire una superficie liscia e uniforme, migliora le prestazioni termiche e acustiche del pacchetto. Una volta completato il posizionamento di tutte le balle di paglia con l'apposita malta, si rimuovono le casseforme e si passa alla stesura dell'intonaco interno ed esterno. Per garantire una buona traspirabilità all'elemento murario si utilizza generalmente un intonaco in calce sulla faccia esterna e uno in argilla per quella interna. [10]



Figura 2.6: Sistema costruttivo GREB

2.2.4 Sistema a cassoni

Questo sistema si differenzia da tutti i precedenti in quanto ha la possibilità di essere utilizzato nei sistemi prefabbricati. I cassoni utilizzati vengono generalmente rivestiti e possono essere posati in opera vuoti, parzialmente o totalmente riempiti. Per quanto dotata di un rivestimento, questa tecnologia costruttiva viene spesso considerata portante, ma non sempre garantisce delle capacità strutturali. Grazie alla sua struttura prefabbricata questo sistema garantisce diversi vantaggi:

- Flessibilità, velocità e adattamento all'opera: vengono posati in tempi molto brevi e possono esser modellati sulla base dell'opera da costruire o dei mezzi di sollevamento disponibili in cantiere.
- Possibilità di utilizzare sistemi completamente a secco: anche il rivestimento viene generalmente utilizzato a secco, evitando l'utilizzo di intonaci che, a causa del periodo di asciugatura, allungano i tempi di cantierizzazione del sistema.

La particolarità della prefabbricazione del sistema a cassoni riduce la facilità di messa in opera che ha caratterizzato fino ad oggi i sistemi in paglia, obbligando l'utilizzo di appositi mezzi di trasporto e sollevamento.

I pannelli, una volta arrivati in cantiere, vengono assemblati secondo una particolare tecnica che attualmente risulta essere la più utilizzata per le strutture prefabbricate in legno: "Platform Frame". Consiste in un sistema in cui ogni piano dell'edificio funge da piattaforma per i piani successivi. Poiché la costruzione avviene un piano alla volta, e ogni solaio viene utilizzato come base per la costruzione delle pareti del successivo, che vengono fissate direttamente sopra il rivestimento dello stesso, anche la sicurezza durante le fasi costruttive aumenta notevolmente. Per questa tecnologia si utilizzano generalmente fondazioni realizzate con platea in cemento armato.

Questi nuovi sistemi in paglia precompressa, assemblati in appositi magazzini e trasportati in loco, sono già presenti in commercio e consentono di ottenere un prodotto di altissima qualità in grado di portare alla realizzazione di edifici con prestazioni energetiche elevate e passive-house.



Figura 2.7: Sistema costruttivo a cassoni

2.2.5 Riqualificazione edilizia

Dopo essere entrata a far parte dei materiali utilizzati per le Nuove Costruzioni, la paglia ha iniziato ad essere impiegata anche per la riqualificazione di edifici esistenti. Avendo un ottimo potere isolante, viene infatti sfruttata come cappotto termico su pareti e coperture. In questo caso lo strato di paglia viene posizionato all'esterno della partizione esistente, necessitando inoltre della costruzione di una propria fondazione. In alcune riqualificazioni, il cappotto viene invece posizionato all'interno; questo in quanto l'isolamento in paglia necessita di una propria struttura in legno che, se applicata a sostegno della muratura esistente, migliora notevolmente le proprietà sismiche dell'edificio. Come materiale isolante la paglia risulta essere un buon compromesso rispetto ai materiali presenti tutto oggi sul mercato; il raggiungimento delle stesse proprietà isolanti è però associato a spessori maggiori di quelli che siamo abituati a vedere. [23] Questa particolarità comporta cappotti di dimensioni differenti (dai 35 ai 50 cm) che spesso generano la necessità di modificare la copertura dell'edificio di intervento per garantire la protezione delle partizioni verticali dagli eventi atmosferici. Come per le nuove costruzioni, anche per l'esistente sono presenti differenti tecnologie di intervento:

- Il metodo più utilizzato presenta un telaio in legno direttamente fissato alla parete esistente all'interno del quale vengono poi posizionate le balle di paglia. Per evitare la risalita di acqua dal terreno e garantire una fondazione allo strato in paglia viene gettato un cordolo in cls o mattoni. Nel caso in cui non sia sufficiente il peso proprio per garantire la compressione e la stabilità del cappotto, gli elementi in paglia vengono fissati alla parete esistente con attraverso delle funi o fasce metalliche. Anche la base della nuova struttura viene fissata al cls attraverso un secondo cordolo in legno per dare più stabilità allo strato di isolamento. Oltre alla struttura in legno formata da montanti verticali posti generalmente a distanza costante, vengono inseriti degli elementi lignei orizzontali per garantire la compressione delle balle sottostanti. Il rivestimento esterno viene realizzato con uno strato di intonaco, la cui stesura non viene facilitata dalla discontinuità fra gli elementi in legno e la paglia.

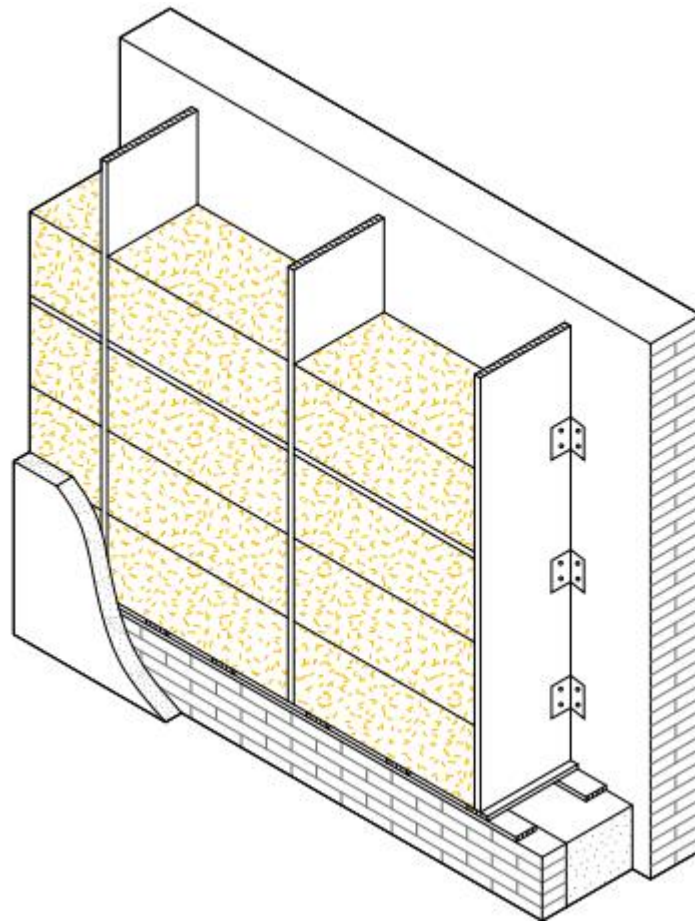


Figura 2.8: Riqualificazione edilizia: primo metodo

- Un altro metodo utilizzato per la realizzazione di cappotti prevede una struttura simile a quella utilizzata nel sistema Post an Beam illustrato precedentemente. Elementi verticali in legno o metallo, annegati in un cordolo in calcestruzzo armato, fungono da struttura principale e collegano tra loro le balle di paglia. Anche in questo caso è presente un secondo cordolo in legno per migliorare il fissaggio del primo corso di balle. Attraverso l'utilizzo di picchetti lignei o metallici, vengono fissate le balle dei corsi superiori ai primi tre. Come nel primo metodo, l'inserimento di traversi il legno garantisce la corretta compressione di tutto il cappotto e l'applicazione dell'intonaco conclude la messa in opera dello strato isolante.

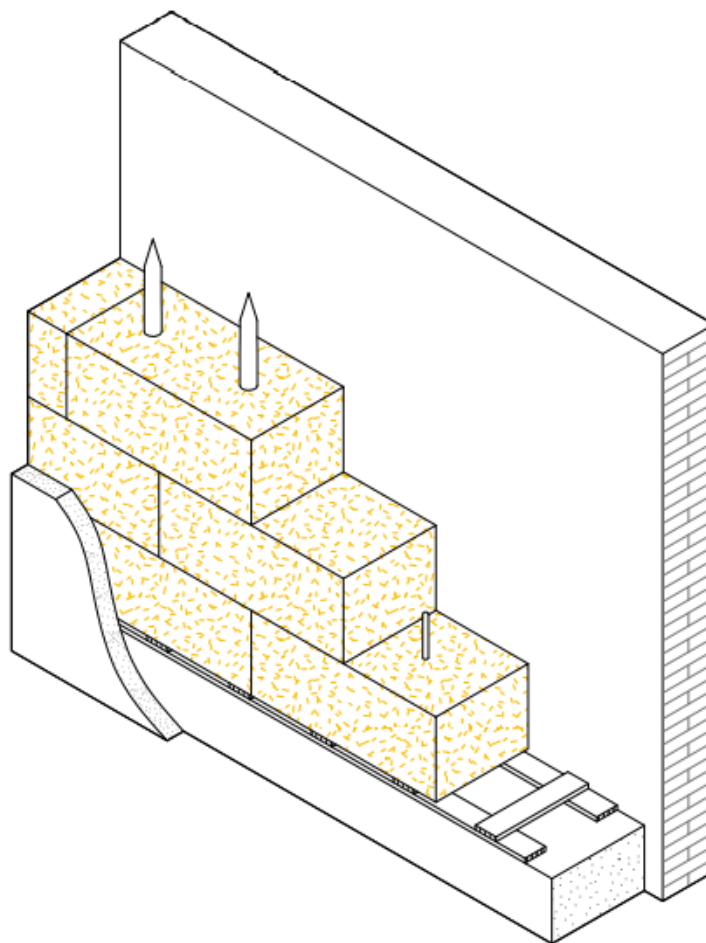


Figura 2.9: Riqualificazione edilizia: secondo metodo

2.3 della paglia accoppiata ad altri materiali

Per quanto fino ad ora sia stata analizzata in balle, avendo un costo ridotto ed essendo coltivata nella maggior parte del globo, nel tempo la paglia è stata accoppiata ad altri materiali, come sabbia, fango e argilla, per sfruttare le sue caratteristiche nella costruzione degli edifici. Lo sviluppo di sistemi moderni, prefabbricati e con ottime prestazioni ha portato a sfruttare principalmente questo materiale da solo, ma, nei paesi in cui la necessità di costruire a basso costo, in tempi rapidi e con metodi costrutti semplici è ancora presente, queste tecniche costruttive vengono tutt'oggi utilizzate.

2.3.1 Adobe

Il termine Adobe viene comunemente utilizzato per indicare il mattone di fango crudo. Questa tecnica costruttiva, ottenuta dall'unione di terra, acqua e paglia mescolate insieme ed essiccate al sole, è la più diffusa al mondo se si considerano quelle in cui la terra cruda è utilizzata come materiale base. Dal punto di vista granulometrico, la composizione

dell'Adobe può variare principalmente in base alle caratteristiche del tipo di terra utilizzato. Quest'ultima deve essere ricavata da una profondità maggiore di 50 cm, onde evitare la presenza di materiale organico che possa generare problemi di stabilità una volta in opera. Esistono principalmente tre tecniche che vengono sfruttate per la produzione dell'Adobe:

- Adobe plasmati a mano.
- Adobe ricavati da estrusione.
- Adobe prodotti attraverso l'utilizzo di stampi in legno e metallo.

La paglia viene aggiunta a questa miscela per portare alla formazione di una struttura fibrosa pluridirezionale in grado di limitare le fessurazioni e il ritiro nel materiale. Essa ha anche la capacità di drenare l'umidità verso l'esterno dei mattoni, alleggerendoli, migliorandone le proprietà termiche e favorendone l'essiccazione. Durante il processo di produzione dei mattoni in Adobe viene inizialmente alzato il contenuto di umidità della terra e successivamente aggiunta la paglia. Una volta raggiunta la consistenza ottimale, attraverso uno stampo in acciaio o legno vengono ricavati i mattoni delle dimensioni desiderate. Il processo termina alla fine dell'essiccazione dei mattoni, che può arrivare a impiegare diversi giorni.



Figura 2.10: Lavorazione e mattoni in adobe

Grazie al clima caldo e secco, l'Adobe viene principalmente utilizzato in Spagna, Africa e Sud America. La sua capacità di non assorbire calore durante i periodi caldi e di trattenerlo in quelli freddi lo renderebbe ottimale anche nel resto del globo ma, a causa della facilità di sgretolamento sotto l'azione di acqua e umidità, ne limita l'utilizzo e comporta una manutenzione continua. La possibilità di applicazione di intonaci ne garantisce una buona resa estetica, ma la vulnerabilità generata dalla presenza di umidità comporta la limitazione a quelli permeabili e traspiranti, che permettono la fuoriuscita di acqua in caso di precedente assorbimento.

Nel tempo, e ancora oggi, sono studiate le corrette percentuali di ogni componente, le loro densità e composizione, anche attraverso l'inserimento di additivi, per aumentare la traspirabilità dei mattoni e migliorare la stabilità sismica delle strutture. Inoltre, sono state

sviluppate varianti che con proprietà simili ma materiali diversi, come i mattoni realizzati in cemento e bitume.



Figura 2.11: Casa realizzata in adobe

2.3.2 Paglia e Argilla

Questa tecnica costruttiva è presente fin dall'antichità nel mondo delle costruzioni grazie alla facilità nel reperire i materiali e alla loro tecnica di messa in opera alla portata di tutti. Migliaia di anni fa, infatti, venivano già edificate partizioni verticali in paglia e argilla contenute all'interno di telai in legno. La paglia all'interno di questa miscela funge da armatura, seppur essendo un filamento sottile ha la capacità di generare stabilità e coesione all'interno dell'impasto una volta che questo si sarà seccato. Negli anni più recenti, attraverso la ricerca e lo sviluppo di nuove soluzioni, le murature costituite da questi due materiali accoppiati iniziarono ad essere rivestite con uno strato di intonaco di calce che, oltre ad aumentarne la durabilità fungendo da strato protettivo, migliorò esteticamente le costruzioni. [31]

2.3.3 COB, massone, bague

Il COB ("grumo") si riferisce a delle parti di terra che vengono plasmate per realizzare pareti e altre geometrie. Esso è una miscela composta da argilla, terra, sabbia, paglia e acqua e viene utilizzato fin dall'antichità come materiale da costruzione.

Questa tecnica costruttiva inizia con la preparazione di un impasto piuttosto denso che, dopo esser stato realizzato, viene trasportato in "cantiere" per essere gettato e impilato per eseguire la costruzione delle partizioni dell'edificio. Anche se utilizzato per la costruzione di

murature di dimensioni importanti, questo materiale non prevede l'utilizzo di casseforme ma viene posato e compattato con l'utilizzo di mani e piedi, e successivamente raddrizzato e levigato attraverso la rimozione delle parti in eccesso. Questa tecnologia costruttiva viene utilizzata per costruire strutture portanti, solide e legate tra loro in modo ottimale. Un esempio delle ottime proprietà di questa tecnica sono i "grattacieli del deserto", realizzati nello Yemen, che possono arrivare a fino a trenta metri di altezza. La realizzazione di queste murature segue diverse operazioni: si inizia sciogliendo la terra per ottenere un materiale più malleabile; successivamente si estrae una parte dell'impasto e ad esso si aggiunge la paglia, amalgamando insieme i due materiali; dopo aver fatto riposare l'impasto per qualche ora si passa alla vera e propria realizzazione della muratura, gettando il composto e comprimendolo con i piedi camminandoci sopra dopo ogni gettata; durante l'edificazione è necessario controllare la verticalità della muratura, raddrizzandola se necessario; una volta realizzata la partizione, aspettare l'essiccamento del composto e successivamente tagliare le parti in eccesso. Generalmente vengono realizzati corsi di 60 cm, sopra i quali verrà poi costruito il successivo, fino al raggiungimento dell'altezza desiderata. [32]

Questa tecnica consente di non utilizzare casseri o strutture in legno, velocizzando il procedimento di costruzione, e, grazie alla malleabilità del materiale e all'assenza di strutture da seguire, permette la creazione di un perimetro anche di forme particolari e curve. Inoltre, durante la fase costruttiva è possibile decidere lo spessore delle partizioni, rendendo più semplice la rastrematura verso l'alto.



Figura 2.12: Casa realizzata in adobe

2.3.4 Torchis

Si tratta di un composto plastico realizzato dall'unione di terra e paglia che viene utilizzato per rivestire una griglia in legno precedentemente fissata alla struttura portante. È una tecnica piuttosto antica che col tempo si è diffusa in gran parte del globo ma che oggi trova ancora utilizzo in Giappone, dove è considerata materiale nobile, e gran parte dell'Africa.

Il composto di paglia e terra, prima di esser messo in opera viene lavorato con trattori, miscelatori o in alcuni casi calpestandolo sul terreno, come veniva fatto agli inizi del suo utilizzo. In questo caso gli steli di paglia non vengono lasciati interi ma tagliati, e uniti alla terra con l'aggiunta di sabbia. [32]

Il processo di realizzazione inizia con la miscelazione di terra e acqua per ottenere un materiale plastico. In questo caso anche la paglia viene messa a bagno per alcune ore prima di essere colata, e aggiunta al materiale plastico. Dopo aver svolto la miscelazione dei materiali con gli appositi macchinari, l'impasto viene lasciato riposare per ore, giorni o settimane sotto un telo di plastica. Una volta pronto, il composto può essere applicato sulla sottostruttura in legno con un'applicazione manuale o con l'utilizzo di una cazzuola. Una tecnica di getto pneumatico del materiale attraverso una pompa a spruzzo è stata sperimentata ma non è ancora abbastanza consolidata da poter essere considerata idonea. La parte più complicata della realizzazione della muratura con questo sistema resta la messa in opera della maglia strutturale di base, che richiede la presenza di un tecnico specializzato nella sua composizione.

2.3.5 Terra-paglia

Consiste nell'utilizzo di terra liquida (barbottina) per bagnare le fibre di paglia attraverso un processo di immersione o aspersione, che devono poi essere inserite all'interno dei casseri. Dopo esser stata posizionata, la paglia viene pressata e posizionata in modo da ottenere la densità e lo spessore del muro richiesti. In questo caso, la funzione principale della terra è quella di tenere unite fra loro le fibre di paglia. Le murature in terra paglia non hanno funzione portante e vengono anche accoppiate a partizioni già esistenti per migliorarne le capacità di isolamento termico e acustico. Grazie alle proprietà di questi due materiali, in caso la struttura in legno risulti avvolta all'interno del composto, manterrà una conservazione nel tempo ottimale.

2.4 Particolari progetti e cantieri in paglia

2.4.1 Nuova costruzione

Casa Rinaudi



Figura 2.13: Casa Rinaudi

Anno di realizzazione: 2016

Luogo: Bra (CN)

Progettista: A. Veglio, E. Castagno (Case di paglia)

Tipologia edificio: villa monofamiliare

Tecnica costruttiva: cappotto ancorato a telaio in legno

Casa Rinaudi è una struttura edificata nel 2016 in strada Montelupa, a Bra, che ingloba al suo interno un ciabòt, ovvero una struttura caratteristica dei vigneti piemontesi utilizzata durante le lavorazioni legate alla viticoltura. La villa monofamiliare, realizzata dai fondatori dello studio “Case di Paglia”, Alessandro Veglio ed Erica Castagno, si sviluppa per 75 metri quadri su due piani ed è stata costruita con solo 45 mila euro grazie all’utilizzo dell’isolante in paglia compressa. La struttura portante, realizzata con travi e pilastri in cemento armato, è stata affiancata ad un tamponamento in paglia compressa che, oltre a completare le partizioni verticali, viene utilizzata anche in copertura tra le travi in legno. L’obiettivo, oltre a contenere i costi di realizzazione, era quello di ridurre i consumi mantenendo una relazione tra gli spazi interni e le colline limitrofe all’esterno, conservando la memoria storica della struttura esistente. Grazie alle ottime proprietà del materiale utilizzato, Casa Rinaudi permette di ridurre i consumi di riscaldamento e raffrescamento fino al 75% rispetto a un

2. La paglia e la sua applicazione nel settore edile

edificio tradizionale e, attraverso il rivestimento esterno in terra cruda o calce, impedisce la penetrazione di insetti e garantisce una microventilazione all'interno della paglia, evitando la formazione di umidità.



Figura 2.14: Primo strato di balle, sollevato dal terreno con un cordolo in legno (sx) e applicazione intonaco di calce e sabbia (dx)



Figura 2.15: Ciabòt interno e struttura portante ricoperta da pannelli di compensato (sx) e tamponamenti esterni in paglia compressa (dx)

Strawbale House Vicenza



Figura 2.16: Strawbale House Vicenza

Anno di realizzazione: 2015 - 2017

Luogo: Vicenza

Progettista: J. Pianezzola

Tipologia edificio: villa monofamiliare

Tecnica costruttiva: cappotto ancorato a telaio in legno

La “Strawbale House” di Vicenza è una delle prime strutture realizzate in Italia sfruttando solo materiali ecosostenibili. Attraverso un involucro composto da legno e paglia, l’architetto Jimmi Pianezzola è riuscito a creare un vero e proprio legame con l’ambiente circostante. La natura dell’opera riesce a garantire un ciclo di vita interamente sostenibile, dalla costruzione, al periodo di utilizzo ed infine con lo smaltimento dei materiali in fase di demolizione. Anche dal punto di vista impiantistico l’edificio garantisce un impatto ambientale praticamente nullo; attraverso l’applicazione di pannelli solari in copertura e di una pompa di calore con sistema di accumulo dell’acqua, la strawbale house riesce a coprire quasi totalmente il suo fabbisogno annuo. Tutti i 160 mq sono costruiti attraverso l’utilizzo di una struttura portante di travi e pilastri in legno, fra i quali sono state inserite delle partizioni realizzate in balle di paglia pressata per garantire un adeguato isolamento termico e acustico. Per preservare lo stato iniziale della paglia è stato scelto di applicare un intonaco leggero e traspirante in calce e canapa che, oltre a garantire una protezione per la struttura interna, migliora notevolmente le caratteristiche di resistenza al fuoco dell’edificio. Questa stratigrafia, realizzata in balle di paglia compresse, è stata sottoposta a specifici test di resistenza al fuoco, garantendo protezione per più di 120 minuti e ottenendo così una classe REI 120. Come per la maggior parte delle strutture in paglia, i costi di costruzione e mantenimento dell’edificio sono stati decisamente inferiori rispetto a quelli realizzati con tecniche tradizionali.

2. La paglia e la sua applicazione nel settore edile



Figura 2.17: Tamponamenti esterni in paglia compressa



Figura 2.18: Struttura portante in legno con partizioni in balle di paglia compressa



Figura 2.19: Prospetto principale edificio



Figura 2.20: Dettaglio interni

Progetto della “Nuova Scuola dell’infanzia”



Figura 2.21: Progetto “Nuova scuola dell’infanzia”

Anno di realizzazione: 2016

Luogo: Savogna d’Isonzo

Progettista: J. Pianezzola

Tipologia edificio: Edificio ad uso scolastico

Questo progetto di una scuola dell’infanzia guidato da Jimmi Pianezzola è un esempio di utilizzo della paglia in edifici di dimensioni maggiori rispetto alle semplici ville unifamiliari. Per quanto lo studio fosse sviluppato attorno all’idea di “bambino” e della sua vita all’interno dell’edificio scolastico, anche in questo caso la sostenibilità ambientale e l’utilizzo di materiali biologici sono rimasti fra i principali obiettivi. Per integrare la struttura nell’ambiente circostante si è scelto di ispirarsi ai pagliai rurali tipici della Slovenia, ovvero degli edifici realizzati in legno con lo scopo di proteggere le balle di fieno dalle intemperie. Per quanto l’uso finale risulti differente, per mantenere questa idea di protezione della paglia si è scelto di integrarla direttamente all’interno dell’edificio. La struttura dell’edificio, progettata con telai e pareti in legno lamellare, grazie anche alla presenza di muri realizzati con balle di paglia, garantisce un ottimo comportamento sismico. Le partizioni, inoltre, mantengono le proprietà della paglia studiate fino ad ora, rendendo la struttura eco-compatibile grazie alle elevate proprietà di isolamento termico e acustico della paglia.



Figura 2.22: Dettaglio portico in legno con stratigrafia annessa

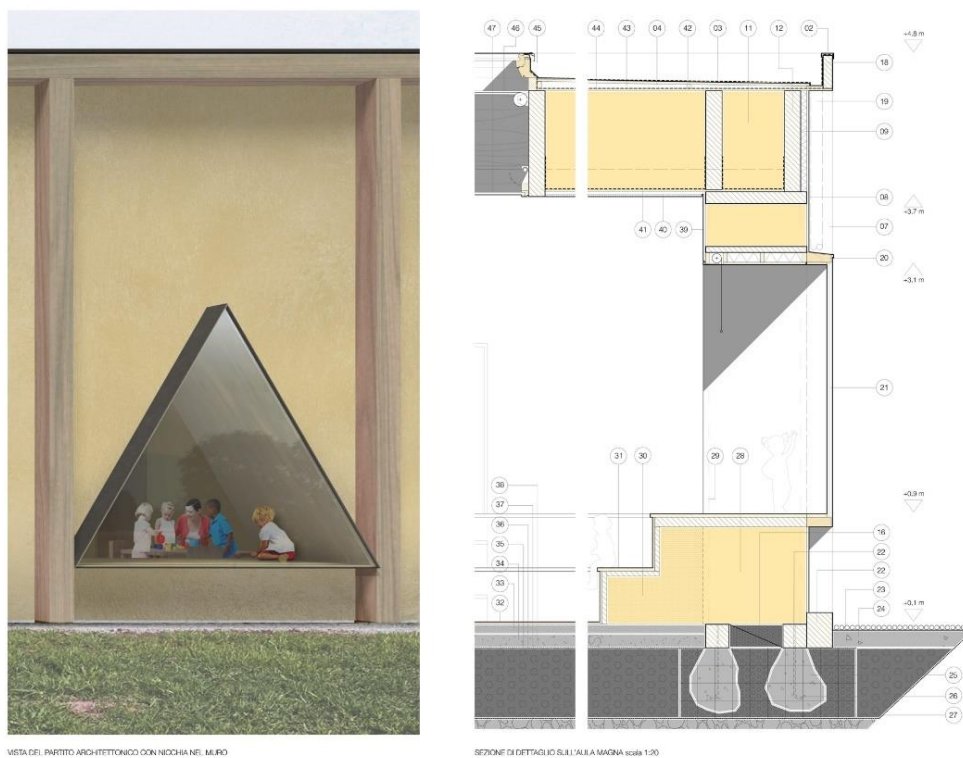


Figura 2.23: Nicchie realizzate nelle pareti per garantire luoghi di pausa e svago con stratigrafia annessa

A recipe to live



Figura 2.24: A recipe to live

Anno di realizzazione: 2011

Luogo: Hokkaido, Giappone

Progettista: Masaki Ogasawara, Keisuke Tsukada e Erika Mikami

Tipologia edificio: villa monofamiliare

Si tratta del progetto vincitore del LIXIL International University Architectural Competition 2011, ovvero una struttura progettata e costruita come edificio adibito alla vita sui pascoli. I tre studenti che l'hanno realizzata hanno cercato di trasmettere un'atmosfera organica che riflettesse l'ambiente pastorale della casa attraverso le luci soffuse e l'utilizzo di materiali naturali come la paglia. La struttura può essere considerata a "energia zero", infatti, possiede un sistema di riscaldamento e raffrescamento che sfrutta la paglia secca e la fermentazione agricola: durante la stagione estiva, la paglia segue un processo di asciugatura all'interno di mensole trasparenti, che riescono in questo modo a proteggere dal calore rilasciando umidità fresca all'interno dell'abitazione; durante la stagione invernale viene invece sfruttato un metodo di fermentazione giapponese, il Bokashi, ovvero una miscela di microrganismi biologici in grado di decomporre rifiuti senza necessità di ossigeno. Attraverso questa tecnica, le pareti in paglia sfruttano durante il periodo invernale la fermentazione del materiale che produce calore e garantisce una temperatura interna che può raggiungere i 30°C. Questa tecnica innovativa per riscaldare e raffrescare gli ambienti, legata alla natura dei materiali con cui è stata realizzata, rendono l'abitazione interamente sostenibile e biodegradabile.



Figura 2.25: Dettaglio partizione esterna in balle di paglia



Figura 2.26: Dettaglio interni

Bale house



Figura 2.27: Bale House

Anno di realizzazione: 2009

Luogo: Bath University

Tipologia edificio: Casa Prototipo

Tecnica costruttiva: Pannelli prefabbricati

La Bale House è un prototipo di casa innovativo a basse emissioni di carbonio realizzato con l'applicazione di pannelli prefabbricati a base di legno e paglia. Il sistema a pannelli utilizzato per la costruzione è il ModCell, studiato negli anni duemila e utilizzato per la prima volta nel 2002 in Inghilterra. La scelta di utilizzo di pannelli prefabbricati ha garantito diversi benefici nella realizzazione del prototipo, come: tempi di costruzione ridotti, minima produzione di rifiuti e minor rischio di incendio in cantiere, sicurezza della costruzione e riduzione del rischio di formazione di umidità nella paglia. [33] I pannelli sono costruiti con un telaio in laminato di legno di conifere riempito con balle di paglia precomprese che, una volta posizionate, vengono rivestite con intonaco a spruzzo per 3 cm di spessore. La costruzione della Bale house è stata sviluppata utilizzando una fondazione tradizionale in lastre di cemento armato e l'applicazione dei pannelli è stata effettuata tramite l'utilizzo di una gru. Il prototipo studiato all'università di Bath è stato sottoposto a diversi test per verificare le proprietà che potesse soddisfare una volta in opera: dal punto di vista della resistenza al fuoco, i pannelli prefabbricati hanno resistito per più di 120 minuti di prova, garantendo una resistenza di REI 120; anche dal punto di vista termico e acustico la

costruzione ha ampiamente soddisfatto i requisiti minimi normativi, garantendo prestazioni elevate con costi relativamente bassi. [21]



Figura 2.28: Dettaglio interni

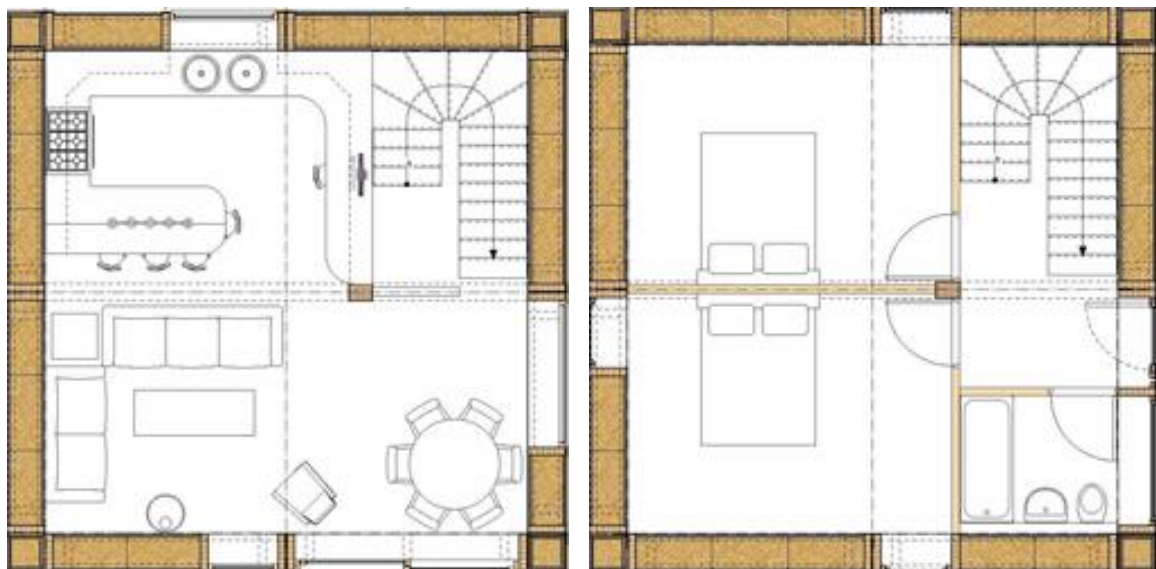


Figura 2.29: Pianta piano terra e piano primo

Casa di paglia a Chamois



Figura 2.30: Casa di paglia a Chamois

Luogo: Chamois, Valle D'Aosta

Progettista: Tiziana Monterisi

Tipologia edificio: Edificio abitativo di 3 piani

Tecnica costruttiva: Pannelli prefabbricati

Questa villa è stata realizzata da Novellocase con l'idea di costruire un edificio con una struttura prefabbricata in paglia ad altissima efficienza energetica. Dopo aver demolito l'edificio in pietra realizzato nel 1834, il suo posto è stato preso da una villa sviluppata su 3 piani su una superficie di circa 200 mq. Le lastre prefabbricate, realizzate nello stabilimento di Novellocase sono trasportate in loco prima attraverso tir, e successivamente con l'uso di un elicottero, a causa del luogo di realizzazione, Chamois, raggiungibile sono tramite funivia. I pannelli, costituiti da legno e paglia di riso, hanno preso posto in tutta la struttura dell'edificio e sono stati utilizzati per il tetto, i solai e le pareti. Grazie all'utilizzo di elementi prefabbricati le tempistiche di edificazione sono state notevolmente ridotte, arrivando a soli 4 giorni per il montaggio di tutti i pannelli. Per integrare l'edificio nel contesto esistente si è deciso di riutilizzare le pietre ottenute dalla demolizione della vecchia struttura, collegando così il nuovo edificio a quello del passato.



Figura 2.31: Vecchio / Nuovo



Figura 2.32: Trasporto pannelli prefabbricati



Figura 2.33: Fase di montaggio dei pannelli prefabbricati

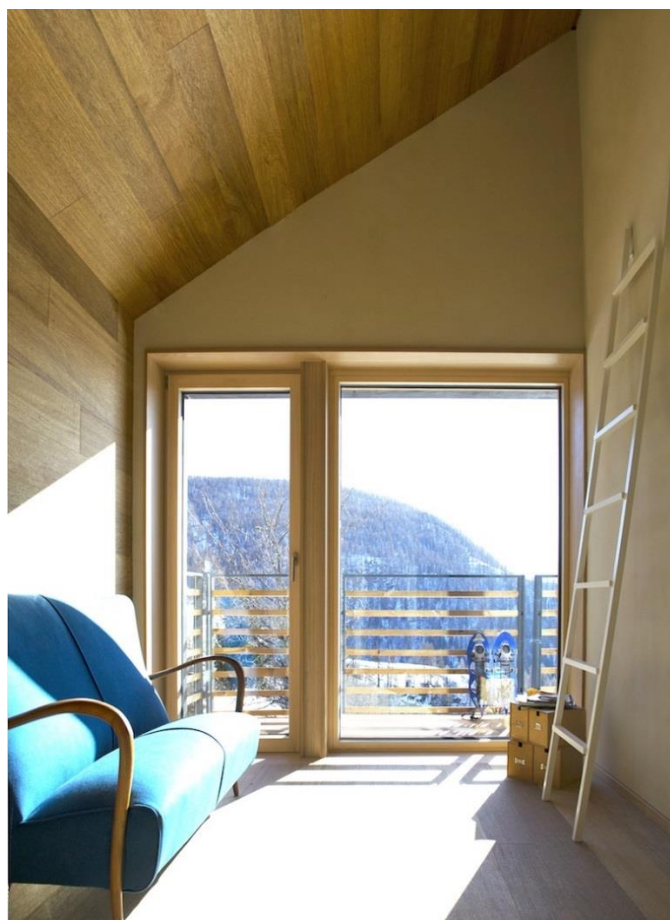


Figura 2.34: Dettaglio interni

Larixhaus



Figura 2.35: Larixhaus

Luogo: Collsuspina, Spagna

Progettista: Nocho Marti Morera, Mario Molins, Oriol Marti

Tipologia Villa unifamiliare

Tecnica costruttiva: Pannelli prefabbricati

Nella penisola iberica è presente un altro esempio di casa unifamiliare costruita sfruttando le tecnologie in legno e paglia. Situata a circa 70 chilometri da Barcellona, l'abitazione si sviluppa su due piani ed è realizzata con una struttura portante in legno. L'isolamento termico è garantito dalla paglia di grano locale, che riempie le partizioni esterne e la copertura. La totalità dell'edificio è stata realizzata in fabbrica attraverso pannelli prefabbricati, riducendo così i tempi di realizzazione in cantiere, mantenendo una standard di cura del dettaglio costruttivo piuttosto elevato ed evitando i problemi legati ai ponti termici dovuti all'errata posa dei materiali. Anche in questo caso la Larixhaus è considerata un edificio passivo, essendo quasi totalmente autosufficiente dal punto di vista energetico. Durante l'estate sono utilizzati i dispositivi esterni di ombreggiamento realizzati sulla facciata sud per evitare l'ingresso di calore mentre, durante l'inverno, sono sfruttati i radiatori elettrici e il sistema di ventilazione con recupero di calore, ottenendo una domanda di riscaldamento annua pari a 15 kWh/mq. Per quanto riguarda la produzione di acqua calda, viene sfruttata una pompa di calore elettrica. Grazie all'utilizzo di materiali biologici si riesce a garantire la salubrità all'interno della struttura, evitando la presenza di sostanze volatili nocive, rilasciate solitamente da alcuni materiali da costruzione tradizionali.

2.4.2 Recupero e riqualificazione

Se in passato l'involucro edilizio ha avuto significati e funzioni differenti ora è inevitabilmente associato alle tematiche riguardanti in contenimento dei consumi energetici degli edifici. Per soddisfare le nuove prestazioni energetiche imposte dalle normative, prestando particolare attenzione al concetto di Bioedilizia, è indispensabile effettuare uno studio delle caratteristiche fisiche dei materiali in opera nei sistemi edilizi presenti sul territorio e porre particolare attenzione alla tipologia e alle prestazioni dei materiali con cui si cerca di riqualificarli. Gran parte del patrimonio edilizio non soddisfa infatti i requisiti imposti dalle nuove normative e, di conseguenza, rende indispensabile un intervento di riqualificazione

Calkin's House



Figura 2.36: Calkin's House

Anno: 2011

Luogo: Alburbesque

Progettista: Cadmond Whitty

Tipologia edificio: Edificio monofamiliare

Tecnica costruttiva: Cappotto ancorato a parete esistente

Il primo esempio di intervento di riqualificazione di un edificio esistente riguarda una villa monofamiliare situata in New Mexico, ad Alburbesque. La struttura originaria era una costruzione in legno su un unico piano, di circa 300 mq realizzata nel 1952, con tecniche costruttive che comportavano prestazioni notevolmente inferiori rispetto a quelle delle strutture più moderne. Oltre ad infissi realizzati con vetri singoli, le partizioni esistenti non aiutavano a garantire una buona efficienza energetica, generando costi piuttosto elevati sia per il raffrescamento che per il riscaldamento. Grazie ai lavori di riqualificazione affidati a Cadmond Whitty, la villa è oggi coibentata completamente con un sistema a cappotto in balle di paglia. Oltre all'isolamento è anche stato aggiunto un secondo piano, costituito da una struttura portante in legno e coibentato con muri di tamponamento in paglia. Per adeguarli ai miglioramenti ottenuti con il cappotto, sono stati sostituiti anche i serramenti e, in copertura, sono stati installati dei pannelli solari. L'intervento migliorativo, oltre ad aver apportati importanti benefici alle prestazioni energetiche dell'edificio, è durato soli quattro mesi.



Figura 2.37: Dettaglio pilastri aggiuntivi per sostenere il secondo piano



Figura 2.38: Rivestimento in paglia per l'intero edificio

Yannick Mollin House



Figura 2.39: Yannick Mollin House

Anno: 2009

Luogo: Laval, Francia

Tipologia edificio: Edificio monofamiliare

Tecnica costruttiva: Cappotto ancorato a telaio in legno

L'intervento di riqualificazione in questo caso è stato eseguito su una struttura monofamiliare preesistente realizzata in blocchi di calcestruzzo armato risalente al 1960. A differenza delle strutture analizzate precedentemente, la Yannick Mollin House era già isolata; la stratigrafia delle partizioni esistenti su cui è stato eseguito l'intervento era infatti composta da un intonaco interno, uno strato di mattoni forati, un'intercapedine d'aria, lo strato isolante in polistirene, un altro strato di mattoni forati e infine l'intonaco esterno, per un totale di 30 cm di spessore. La riqualificazione dell'immobile ha portato all'applicazione di un cappotto in paglia sulle partizioni verticali esterne e alla sostituzione di tutti gli infissi dell'abitazione. In copertura, oltre all'utilizzo di un insufflagio di cellulosa per migliorarne l'isolamento, sono stati applicati dei pannelli solari. Per il riscaldamento e raffrescamento vennero infine integrati un sistema di ventilazione meccanica controllata e una stufa a legna.

2. La paglia e la sua applicazione nel settore edile



Figura 2.40: Posizionamento balle di paglia nel telaio in legno



Figura 2.41: Dettaglio pannelli di Celenit attorno alle finestre con intonaco di calce posato sulla paglia

House Simma



Figura 2.42: House Simma

Anno: 2011

Luogo: Langenegg, Austria

Progettista: Georg Bechtel

Tipologia edificio: Edificio monofamiliare

Tecnica costruttiva: Cappotto ancorato a telaio in legno

La House Simma è un'abitazione privata ricavata dalla riqualificazione di una casa degli anni '60 di circa 140 mq. Georg Bechtel, l'architetto incaricato dell'intervento, decise di mantenere in vita una sola parte dell'edificio: i due piani, interrato e terra, sono stati riqualificati mentre il piano secondo è stato demolito per lasciare spazio alla costruzione di una struttura completamente nuova. L'applicazione del cappotto in paglia si è quindi limitata ai piani inferiori mentre per la parte superiore si è scelto un telaio portante in legno tamponato con balle di paglia. Come è possibile notare dalle immagini, una volta terminato l'intervento di applicazione del cappotto di paglia sulla parte esistente, lo spessore delle partizioni verticali è arrivato a misurare circa 90 cm. Per ovviare all'impatto che ciò potesse avere sull'ingresso della luce naturale dagli infissi sono state utilizzate delle strategie innovative che riducessero lo spessore in corrispondenza delle aperture. Grazie al comportamento termico dell'edificio, per il riscaldamento ed il raffrescamento è stato sufficiente integrare una stufa a legna e un sistema di ventilazione meccanica controllata con recupero di calore.

2. La paglia e la sua applicazione nel settore edile



Figura 2.43: Dettaglio interni



Figura 2.44: Dettaglio costruttivo dell'adeguamento dei profili in legno per le finestre a causa dello spessore del cappotto in paglia

Casa di Riso Sciolze



Figura 2.45: Casa di riso a Sciolze

Luogo: Sciolze

Progettista: Tiziana Monterisi

Tipologia edificio: Edificio monofamiliare

Tecnica costruttiva: Pannelli prefabbricati

Progettata da Tiziana Monterisi, la ristrutturazione di un vecchio edificio in muratura con l'utilizzo di materiali naturali ha portato alla realizzazione della Casa di Riso. L'intervento di riqualificazione ha compreso la totalità della struttura esistente. La copertura è stata completamente eliminata e al suo posto ne è stata costruita una prefabbricata con la struttura portante in legno e tamponamenti in paglia di riso, superiormente è infine stata rivestita con tegole piane in cotto bruno. Per quanto riguarda la parte in muratura è stato scelto di utilizzare sempre un cappotto in paglia di riso, poggiato su un cordolo inferiore coibentato con pannelli isolanti per evitare la formazione di possibili ponti termici e per impedire la risalita capillare delle balle di paglia. I serramenti non solo sono stati sostituiti con elementi più performanti ma sono anche stati posizionati direttamente in corrispondenza del cappotto per evitare problemi con l'ingresso della luce naturale. Come rivestimento esterno è stato scelto di utilizzare un termointonaco a base di calce naturale e lolla di riso, applicato su una rasatura a base di calce naturale e pula di riso.



Figura 2.46: Posizionamento pannelli copertura



Figura 2.47: Posizionamento cappotto in balle di paglia

3 Proprietà e caratteristiche della paglia

3.1 Caratteristiche tecniche della paglia

3.1.1 Orientamento steli

Le proprietà degli edifici in paglia vengono anche condizionate dal differente posizionamento degli steli all'interno delle balle. In particolare, la conduttività termica di questi elementi dipende principalmente da due fattori: la densità della palla e l'orientamento delle fibre al suo interno. Per valutare l'effetto dell'orientamento delle fibre sulle proprietà termiche sono stati effettuati diversi test, Veieliene ha analizzato separatamente l'orientamento e la lunghezza delle fibre nella paglia sfibrata e tirata, ottenendo come risultato che la conducibilità termica aumenta quando le fibre sono state orientate orizzontalmente e diminuisce quando sono orientate verticalmente. Ciò accade principalmente per due motivi: variazione del volume d'aria e percorso del flusso di calore. Se consideriamo le fibre disposte in orizzontale, il flusso di calore passa parallelo ad esse attraverso la palla e solo l'aria influisce sulla resistenza. Se sono disposte in verticale invece, non solo l'aria, ma anche le fibre di paglia influiscono sulla resistenza della palla. Durante il processo di imballaggio è quindi indispensabile riporre particolare attenzione a come le fibre vengono orientate, in quanto questo fattore incide notevolmente sulla conduttività termica finale. [34]

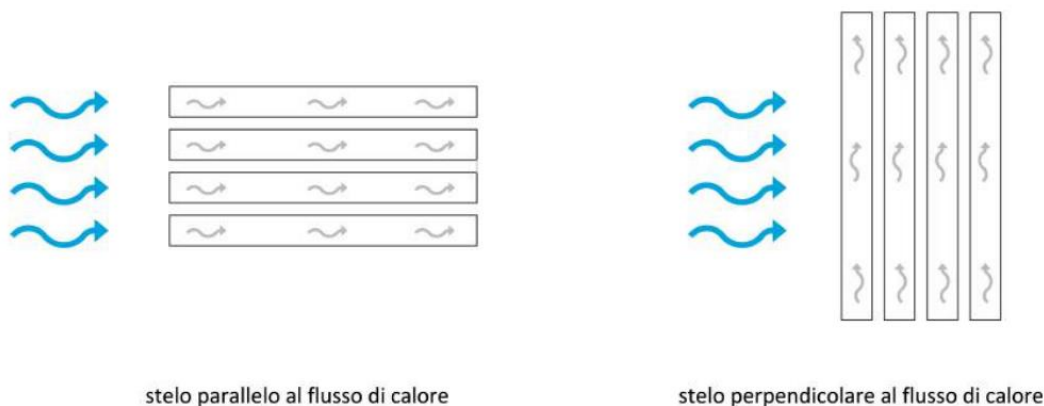


Figura 3.1: Orientamento Steli

3.1.2 Sisma

La paglia, utilizzata in balle all'interno del mondo delle costruzioni, ha la capacità di rendere molto più leggero e flessibile l'edificio durante una scossa sismica rispetto ad uno realizzato in mattoni tradizionali o in calcestruzzo armato. Dal 2008 però, in Italia non è più possibile costruire edifici con la struttura portante in paglia, di conseguenza la tecnica più presente è realizzata con strutture portanti in legno riempite da elementi in paglia. Questo principalmente perché la normativa italiana non conosce correttamente la tecnica costruttiva "Nebraska", realizzata con muri portanti in paglia. A dimostrazione delle buone caratteristiche di questo materiale, presso il laboratorio del Network for Earthquake Engineering Simulation, Università del Nevada a Reno, (US), sono stati effettuati test specifici su questa tipologia di edifici. Il provino è stato inizialmente testato sotto una scossa di terremoto con Magnitudo 7.6, pari quella avvenuta nel 2005 in Pakistan, e successivamente a una potenza 200% superiore alla precedente. La struttura, non solo è riuscita a resistere alla prima scossa senza particolari problemi, ma ha garantito la propria integrità anche con la seconda scossa. La ottima capacità di resistenza al sisma non viene attribuita alle sole strutture con pareti portanti in paglia; anche l'unione di una struttura portante in legno accoppiata a un riempimento in paglia fornisce un ottimo comportamento alle azioni sismiche. Anche se la risposta al sisma di un edificio è attribuita principalmente alla struttura portante, la presenza di elementi in paglia, leggeri e flessibili, contribuiscono all'assorbimento delle vibrazioni limitandone gli effetti. [35]

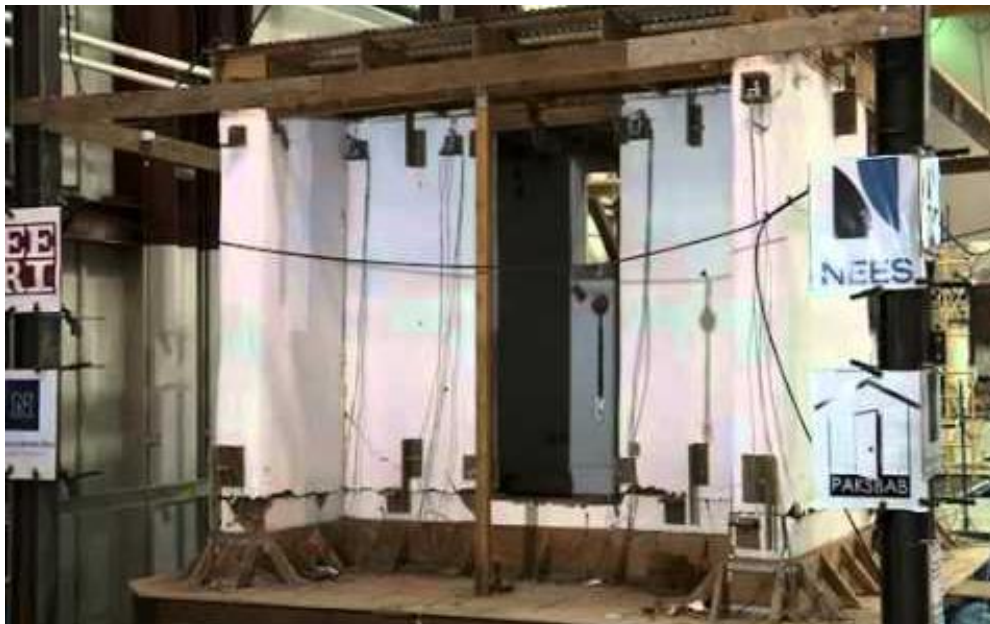


Figura 3.2: Effetti scossa 7.6

3.1.3 Isolamento termico

La paglia, oltre che per la sua buona resistenza strutturale, viene utilizzata nel mondo delle costruzioni per le sue ottime proprietà di isolamento termico. Esso dipende principalmente dalla densità della balla, dall'orientamento delle fibre al suo interno, come spiegato precedentemente, e dal contenuto di umidità presente nella paglia. Essa è inoltre composta di cellulosa, ovvero un elemento poco conduttivo, che circonda le differenti sacche d'aria all'interno, anch'esse con proprietà di conducibilità molto basse. Essendo sempre più utilizzata per questo scopo, il valore di conducibilità è stato al centro di diversi studi. Prima di analizzarne i risultati è necessario considerare che il loro valore sarà influenzato dalla quantità di umidità nella paglia, dalla densità delle balle e dalle differenti condizioni in cui sono stati svolti. Come analizzato da Minke e Mahlke [36], balle di paglia posizionate di coltello con gli steli posti perpendicolarmente alla direzione del flusso di calore presentano un valore di conducibilità termica pari a $\lambda = 0,045$ W/mK mentre, per balle posizionate di piatto, con gli steli posti parallelamente alla direzione del flusso di calore, presentano un valore di conducibilità termica pari a $\lambda = 0,06$ W/mK. Non troppo differenti sono i risultati ottenuti dall'associazione FASBA, che attribuiscono un valore di conducibilità termica pari a $\lambda = 0,052$ W/mK nel caso di balle poste a coltello con fibre perpendicolari al flusso. [37] McCabe [38] ha invece studiato la conducibilità termica di due differenti balle di paglia di frumento, utilizzando campioni di densità 133 kg/m³. Anche in questo caso il valore ottenuto dalla balla con le fibre perpendicolare risultava inferiore di quello con la balla con le fibre parallele, rispettivamente $\lambda = 0,046$ W/mK e $\lambda = 0,061$ W/mK. Per studiare la variazione di conducibilità termica, causata dai cambiamenti di temperatura e densità, Ashour e Wu [39] hanno analizzato due tipi di paglia: frumento e orzo. Nei provini, di dimensioni 60x38x36, si è notato un aumento della conducibilità in concomitanza con la riduzione della densità e con l'aumento della temperatura. In entrambi i casi, aumentando la densità della balla si è ottenuta: prima una diminuzione di conducibilità, fino a un valore limite a cui si è stabilizzata, e successivamente un nuovo aumento. Attraverso altre analisi si è studiato l'effetto della variazione del contenuto di umidità sulla conducibilità dei provini. I risultati hanno mostrato che il suo valore aumenta notevolmente con il contenuto di umidità a causa dell'elevata porosità delle balle, in grado quindi di assorbire molta acqua raggiungendo densità maggiori. Attraverso un'analisi della letteratura presente su questo argomento è possibile definire un intervallo all'interno del quale ricade il valore di conducibilità della paglia; prendendo in considerazione i dati sopra citati e quelli analizzati in altri documenti (Tabella 3.1) si definisce come intervallo di riferimento quello che va da $\lambda = 0,04$ W/mK a $\lambda = 0,13$ W/mK.

3. Proprietà e caratteristiche della paglia

Anno	Autore	Posizionamento	Densità [kg/m ³]	λ [W/mk]
1993	McCabe	Piatto	133	0,061
1993	McCabe	Coltello	133	0,046
1994	Sandia Labs	Coltello	83	0,054
1996	ORNL	Piatto	n.d.	0,153
1997	CEC/ATI	Piatto	107	0,128
1998	ORNL	Piatto	107	0,1
1995	Ship Harb.	Piatto	128	0,1
2004	Andersen	Piatto	75	0,057
2004	Andersen	Coltello	75	0,052
2004	Andersen	Piatto	90	0,06
2004	Andersen	Coltello	90	0,056
2005	Mike e M.	Piatto	n.d.	0,06
2005	Mike e M.	Coltello	n.d.	0,045
2010	Olivia	Piatto	80-120	0,065
2010	Olivia	Coltello	80-121	0,045
2014	FASBA	Coltello	n.d.	0,052
2019	Mutani	Piatto	62	0,082
2019	Mutani	Piatto	75	0,057
2019	Mutani	Coltello	75	0,052
2019	Mutani	Coltello	81	0,057
2019	Mutani	Coltello	100	0,038
2019	Mutani	Piatto	150	0,06
2019	Mutani	Coltello	150	0,048

Tabella 3.1 Dati di isolamento termico delle balle di paglia presenti in letteratura

3.1.4 Isolamento acustico

La paglia può essere considerata un buon isolante acustico grazie dell'elevata presenza di pori e micropori al suo interno e della massa di cui è dotata. Generalmente, lo strato di intonaco da cui è rivestita internamente ed esternamente svolge un ruolo fondamentale nel potere fonoisolante delle partizioni in paglia. La combinazione dei due differenti materiali, lo strato di intonaco come elemento rigido e la paglia come strato con una buona massa, disposti in modo alternato, creano un disaccoppiamento acustico e rendono la parete un ottimo isolante acustico. Questa proprietà ha permesso di utilizzare le balle sia nelle infrastrutture, come barriere antirumore per autostrade e aeroporti, che nel mondo musicale, all'interno di studi di registrazione. Per quantificare la bontà di questo materiale, sono stati effettuati test specifici su balle di paglia o edifici realizzati con esse. Durante uno studio effettuato in Australia, sono stati effettuati dei test per valutare il potere fono isolante di una partizione verticale in paglia di 45 cm di spessore. Considerando i 116 db presenti all'interno, esternamente sono stati misurati dai 62 a 77 db, ottenendo un valore di abbattimento generato dalla parete da 54 a 43 db. [40] Un altro fattore da prendere in considerazione è la direzione delle cannuccie all'interno della balla, che può influire sul valore finale di isolamento. In un test effettuato su due partizioni in paglia con differente orientamento delle cannuccie, nella prima posizionate perpendicolarmente al piano del muro e nella seconda parallelamente, i risultati hanno mostrato un abbattimento acustico di 52 e di 46 db. Attraverso un'analisi della letteratura presente su questo argomento è possibile definire un intervallo all'interno del quale ricade il valore di isolamento acustico della paglia; prendendo in considerazione i dati citati e quelli analizzati a questo scopo, si ritiene che l'abbattimento acustico delle pareti in paglia, per quanto dipendente dalla densità e dallo spessore, sia indicativamente tra i 40 e i 55 db.

3.1.5 Resistenza al fuoco

Il comportamento al fuoco della paglia, che viene generalmente considerata come un insieme di singoli steli altamente infiammabili, può trarre in inganno. La paglia sfusa è un materiale con un grado di infiammabilità piuttosto alto, una volta imballata però, la sua densità aumenta notevolmente, l'aria al suo interno diminuisce e la sua infiammabilità si riduce drasticamente a causa dell'assenza di uno dei tre componenti fondamentali alla combustione, il comburente. Questo permette alle partizioni in paglia di avere un ottimo comportamento al fuoco, raggiungendo valori di resistenza che possono superare i 120 minuti. Per quanto la parete garantisca sicurezza in caso di incendio, è importante sottolineare il rischio presente durante la fase di cantierizzazione, in cui le lavorazioni delle balle e le loro movimentazioni, comportano lo sfaldamento del materiale e la sua dispersione sul terreno, che genera un rischio di incendio piuttosto elevato. La resistenza delle balle è spesso strettamente legata alla presenza dello strato di intonaco di rivestimento su entrambi i lati. Questo grazie alla capacità degli intonaci di non permettere il passaggio di aria sufficiente ad alimentare la combustione della paglia sottostante. Se anche l'intonaco dovesse fessurarsi, si assisterebbe alla formazione di uno strato esterno di paglia carbonizzata in grado di proteggere lo strato sottostante impedendo il passaggio di ossigeno. Visto il livello di conoscenza necessario per utilizzare un materiale con funzioni strutturali, e non, all'interno di un edificio, sono stati

effettuati svariati test sulla resistenza al fuoco di questo materiale, per garantire una sicurezza adeguata ai suoi successivi utilizzatori. Minke e Mahlke hanno verificato che una partizione in paglia rivestita con un intonaco di 3 – 5 cm garantisce una protezione dall'incendio di circa 1,5 / 2 h ore di tempo. [41] Anche Apte ha eseguito un esperimento simile, eseguendo un test di resistenza al fuoco su una balla di paglia rivestita con 4 cm di intonaco, evidenziando che, dopo essere stata esposta per 10 minuti a 29 kW/m², la balla si trovava ancora in ottime condizioni. Sono stati svolti anche test sull'infiammabilità di una parete composta soltanto di paglia, esponendola a fuoco diretto a 920° per 30 minuti. Il risultato del test ha mostrato che meno della metà della balla aveva subito il processo di carbonizzazione. È quindi possibile confermare le ottime capacità di resistenza al fuoco della paglia, anche confrontando le sue caratteristiche con quelle degli altri materiali da costruzione più moderni. È però importante diffondere maggiormente i rischi legati all'utilizzo di questo materiale in cantiere, utilizzando le idonee precauzioni e evitando lavorazioni pericolose come la saldatura nei luoghi con presenza di residui.

3.1.6 Resistenza all'umidità

La paglia è un materiale di origine naturale e, di conseguenza, è portata ad assorbire dall'ambiente circostante l'acqua. È quindi un materiale con caratteristiche di igroscopicità, che possono variare anche in base alla differente microstruttura che della pianta, dipendendo quindi dalla tipologia di paglia, dal luogo di coltivazione, e da altri fattori legati alle sue condizioni di crescita. Questa caratteristica è però altamente dannosa all'interno del mondo delle costruzioni, in quando la presenza di umidità nei materiali genera degradi e danni alla salute delle persone. Proprio per questo motivo è indispensabile prestare particolare attenzione ad evitare le infiltrazioni di umidità e il contatto diretto con l'acqua. [42] La resistenza, la durabilità e le proprietà delle partizioni in paglia vengono principalmente condizionate da questo fattore, che viene principalmente generato da una scarsa progettazione, dalla possibile risalita di acqua dal terreno, dalla scarsa manutenzione o da fasi costruttive eseguite in modo scorretto o superficiale. L'attenzione nella fase costruttiva e progettuale però non basta, l'imballaggio, il trasporto e lo stoccaggio delle balle di paglia possono essere le cause di infiltrazione di umidità e della conseguente formazione di muffe nel materiale. Anche in questo caso, un'importante alleato della paglia è l'intonaco; la scelta di quello adeguato è essenziale per garantire la salubrità della partizione. Alle pareti in paglia bisogna abbinare intonaci con un coefficiente di resistenza alla diffusione del vapore acqueo piuttosto basso, che siano quindi in grado di rilasciarla facilmente, evitando dannosi accumuli di acqua. [43] Anche se il decadimento del materiale e la conseguente formazione di muffe avviene attorno al 25% di umidità, è necessario mantenere il materiale sempre al di sotto del 15% per non rischiare problemi di stabilità al suo interno. Il limite di 25% definisce una soglia sicura in cui operare per evitare degradi, ma anche a seguito degli studi effettuati, la letteratura non fornisce ancora una risposta valida su come valutare il rischio in caso di superamento di tale valore. Anche la traspirabilità del materiale diventa quindi importante per eliminare l'umidità in eccesso, e non va ostacolata attraverso l'applicazione di barriere o materiali che non permettono il passaggio d'aria. Il rischio principale della scarsa manutenzione di un edificio in paglia è l'aumento dell'umidità al suo interno, questo

comporta una perdita di capacità termica, una riduzione di resistenza strutturale e la formazione di muffa e funghi. Esistono diversi metodi per il monitoraggio dell'umidità nelle costruzioni in paglia ma, per evitare interventi invasivi, uno dei più efficaci consiste nella misurazione della resistività elettrica di elementi in legno posizionati all'interno della stratigrafia o direttamente della paglia stessa attraverso dei misuratori integrati nelle balle. Se non è possibile utilizzare queste tecnologie, è necessario effettuare misurazioni indirette calcolando i valori di umidità relativa del materiale. [44]

3.1.7 Sostenibilità

All'interno del mondo delle costruzioni esistono dei diversi metodi per valutare il livello di sostenibilità di un edificio. Il LEED è uno dei tanti utilizzati, e permette di comprendere quale impatto ambientale comporta la struttura in tutto il suo ciclo di vita. Ma quando si parla di sostenibilità, di cosa si tratta esattamente?

La sostenibilità corrisponde al processo con cui si prova a trovare un equilibrio all'interno di un sistema ecologico soggetto a un notevole sfruttamento ambientale. Spesso la sostenibilità è legata allo sviluppo e all'innovazione, pensati per soddisfare i bisogni del presente senza influenzare il futuro delle prossime generazioni. Anche nel mondo delle costruzioni questo processo è ormai considerato la base della progettazione di ogni edificio ed infrastruttura, e prende in considerazione ogni singola parte del ciclo di vita di ciò che verrà edificato. Parlando di sostenibilità e sviluppo sostenibile, si racchiude anche tutto il processo di produzione delle materie prime utilizzate, del loro smaltimento o del loro possibile riciclo a fine vita. Per quando si possa pensare che l'energia e le emissioni prodotte durante la vita dell'edificio siano la parte più ingente a cui bisogna far fronte, in realtà la necessità di ricercare materiali da costruzione con un impatto ambientale minimo, dimostra quanto i processi di estrazione, produzione e smaltimento siano dannosi per la vita del nostro pianeta. Il benessere prodotto dall'utilizzo di materiali sostenibili non è solo legato al quantitativo di emissioni in ambiente; è stato dimostrato che utilizzare materiali come vernici e prodotti adesivi, contenenti notevoli valori di VOC (composti organici volatili), abbia effetto negativo sul benessere psico-fisico dei residenti nell'immobile. Proprio per questo motivo, l'utilizzo di materiali sostenibili, naturali e riciclati, avrebbe un impatto positivo anche sulla vita di tutti i giorni di chi li sceglie. Questo è strettamente legato alla riduzione di emissioni di CO₂, la paglia infatti, utilizzata come isolante termico, ha un impatto ambientale nettamente inferiore confrontata a tutti quei materiali che devono essere prodotti all'interno di uno stabilimento con un dispendioso ciclo produttivo. La paglia è un materiale non inquinante, biodegradabile e che può essere riutilizzato alla fine della sua vita all'interno della struttura. Questo comporta un impatto molto positivo, in quanto essa non debba essere smaltita ma possa essere riutilizzata come lettiera per animali o anche impastata con terra cruda per tornare a far parte di un edificio. Attraverso uno studio dell'università di Bath (Inventory of Carbon & Energy - ICE), che tratta i dati di energia grigia e i coefficienti di carbonio dei materiali da costruzione, l'energia grigia della paglia viene quantificata in 0.24 MJ/kg. In confronto con altri materiali con la stessa funzione, come isolanti minerali e plastici, risulta essere rispettivamente 35 e 120 volte minore. [45] Attraverso uno studio (Wihan, 2007) si è evidenziato che i kg di CO₂ presenti in 1 kg di paglia sono 0,023 kg di

CO₂, che la quantità di CO₂ immagazzinata in 1 kg di paglia è pari a 2.22 kg e che le emissioni di CO₂ per 1 kg di paglia imballata pari a -2.197 kg di CO₂. È facilmente comprensibile che il bilancio finale risulta negativo, in quanto, durante la fotosintesi, la paglia riesce a immagazzinare diossido di carbonio. L'utilizzo di questo materiale, organico, naturale e sostenibile comporterebbe quindi un grandissimo beneficio sull'ambiente che ci circonda. [10]

3.1.8 Decomposizione

La paglia è un materiale di origine vegetale che in particolari condizioni può iniziare un processo di decomposizione. Avendo un comportamento di tipo igroscopico, infatti, ha la capacità di assorbire le molecole d'acqua e il vapore presenti nell'ambiente circostante. In ogni caso, se entra in contatto con l'acqua, non inizia subito la sua decomposizione. Tale processo si instaura infatti nel momento in cui la paglia raggiunge la totale saturazione delle fibre, portando al decadimento dei microorganismi che si trovano al suo interno che, a quel punto, attaccano il materiale. Questa condizione di saturazione avviene attraverso la concomitanza di particolari fattori:

1. Corretta temperatura: la crescita di muffe e funghi avviene generalmente in un intervallo tra i 20°C e i 70°C
2. Sufficiente contenuto di umidità: è importante che si raggiunga una soglia minima per l'inizio della decomposizione
3. Presenza di ossigeno
4. Presenza di sostanze nutrienti

La velocità di decomposizione varia anche in base al tipo di paglia analizzata. Andando a confrontare alcune specie di frumento utilizzate come sostanza organica e lasciate decomporsi nel terreno, è possibile notare come la maggior presenza di silicio nella pianta aumenti notevolmente le tempistiche di tale processo. Il Processo di decomposizione di Frumento e Orzo, il cui contenuto di silicio è di gran lunga inferiore a quello della paglia di riso, è molto più veloce di quest'ultima, che impiega invece circa due anni per terminare il processo. [46]

Per ritardare e prevenire la decomposizione della paglia è quindi indispensabile evitare il contatto diretto con l'acqua e limitare il più possibile la presenza in essa di umidità. La conservazione delle balle è un processo che va controllato dalla creazione dell'elemento attraverso la macchina imballatrice fino alla messa in opera del prodotto e al suo ciclo di vita. Esse vanno conservate e stoccate in luoghi asciutti, protetti dalle intemperie ma abbastanza ventilati e vanno mantenute a una distanza minima del terreno, evitando il contatto diretto e la conseguente risalita di umidità.

Anche la fase precedente all'imballaggio deve essere adeguatamente controllata. La paglia non deve infatti contenere umidità al suo interno onde evitare la progressiva crescita di

microorganismi con la conseguente formazione di funghi e muffa una volta imballata. In ogni caso, per quanto si possa limitare il più possibile la presenza di umidità, è importante sottolineare la natura di questo materiale, che alla fine del suo normale processo di vita tende comunque a decomporsi come qualsiasi specie vegetale. [10]

Prima di impiegare questo materiale nel mondo delle costruzioni è quindi indispensabile scegliere con cura il tipo e la specie di paglia anche in base alla sua capacità di resistere nel tempo e, ancor di più, conoscere le condizioni in cui questa è stata imballata, il metodo di imballaggio, la sua conservazione nel tempo, la maturità della paglia utilizzata e il trasporto cui questa arriverà sul luogo di edificazione. Non meno importante sarà infine l'utilizzo che ne verrà fatto dagli utilizzatori finali, che dovranno mantenerla e controllarla nel tempo.

3.1.9 Possibilità di autocostruzione

La paglia è un materiale facilmente reperibile, oltre a crescere nella maggior parte dei paesi, viene spesso eliminato e bruciato a causa della sua eccedenza dai coltivatori. Il suo inutilizzo, legato al conseguente costo piuttosto basso, alla sua leggerezza e maneggevolezza, rendono la paglia un'ottima soluzione nei casi in cui si voglia realizzare un edificio in autocostruzione. Seguendo un processo semplice e schematico, anche per i futuri occupanti dell'edificio, è infatti possibile partecipare al processo di costruzione della struttura. Per quanto semplice rispetto alle metodologie costruttive moderne, anche un edificio in paglia necessita di un professionista del settore che segua ogni passo del cantiere e che guidi i gruppi di persone incaricati all'esecuzione dell'opera fino al suo compimento. Questo permette di diffondere la capacità di autocostruire le abitazioni in paglia anche nei luoghi dove l'avanzamento tecnologico non è comparabile con quello dei paesi industrializzati o dove il costo di costruzione risulterebbe troppo elevato. Esistono ancora diversi luoghi sulla terra dove la pratica di costruirsi la propria abitazione è ancora in atto e la possibilità di utilizzare tecniche semplici con materiali naturali come la paglia consentirebbe di ottenere strutture piuttosto prestanti con sforzi e costi relativamente contenuti. È importante ricordare che l'autocostruzione si è sempre basata sull'utilizzo di materiali "umili", naturali e largamente diffusi, attraverso l'utilizzo di tecniche semplici ma avanzate, in grado di edificare strutture di un livello simile a quelle costruite con tecniche tradizionali.

3.1.10 Traspirabilità

Tra le tante caratteristiche di questo materiale, la traspirabilità viene spesso trascurata, ma per la vita utile delle costruzioni in paglia, questa proprietà è assolutamente indispensabile. La paglia è infatti un materiale traspirante, che permette quindi la migrazione del vapore acqueo presente all'interno dell'aria, da una parte all'altra della parete. Questo consente di mantenere nella partizione un ambiente asciutto e salubre, prevenendo la formazione di funghi e muffe e mantenendo la percentuale di umidità sotto i limiti richiesti. Questa proprietà risulta efficace solo se tutto il pacchetto in cui si trovano le balle consente il

passaggio di aria. È quindi di primaria importanza utilizzare intonaci traspiranti, per esempio in calce e terra cruda, ed evitare l'utilizzo di elementi non traspiranti come membrane o lastre di materiali completamente impermeabili.

3.1.11 Costo

Quando si sceglie un materiale da impiegare nella costruzione di un edificio, il costo ha spesso un'incidenza importante sulla scelta finale. La paglia è un prodotto naturale spesso non utilizzato, si ottiene dagli scarti della produzione di materie prime ed è in eccedenza rispetto al quantitativo utilizzato. Cresce in gran parte del nostro pianeta e, di conseguenza, non deve più di tanto far fronte ai costi legati al suo trasporto. Il suo costo varia generalmente fra 1,50 € a 2,50 € a balla e, considerando l'impiego di circa 300 balle per edificio, il costo totale può variare tra i 450 e i 750 euro. Se si pensa ai costi di un'abitazione moderna, i valori non sono neanche lontanamente comparabili. Ciò non considera inoltre l'abbattimento dei consumi relativi al riscaldamento, circa $\frac{1}{4}$ rispetto ai valori di un'abitazione "normale". Questi valori mettono gli edifici in paglia in una posizione di estremo vantaggio rispetto a quelli cui siamo abituati. Considerata la possibile variazione del valore limite di trasmittanza ammissibile per le pareti di edifici ad uso abitativo (fino a 0,25), quella garantita da un'abitazione in paglia sarebbe già pronta a soddisfarli, senza aumenti di costi o particolari modifiche. Per quanto questo materiale sembri non aver concorrenti, l'assenza di norme specifiche che regolino la costruzione di questi edifici e la conseguente poca conoscenza da parte dei professionisti, ne limita notevolmente l'utilizzo e comporta un dispendio di energie e soldi che potrebbero essere in molti casi risparmiati.

4 Il problema della durabilità

Quando si parla di edifici in balle di paglia, le prime domande che ci si pone sono generalmente legate al rischio di incendio e alla possibile presenza di roditori nel materiale. Nel mondo delle costruzioni è ormai noto che, attraverso l'applicazione di un adeguato strato di intonaco o di un apposito rivestimento esterno, questi problemi possono essere facilmente risolti. In questo capitolo viene trattato quello che risulta essere il principale limite di questi sistemi, la vulnerabilità della paglia alla presenza di umidità e la conseguente formazione di muffe e degrado del materiale. Tutto ciò cercando di individuare l'intervallo all'interno del quale paglia e umidità possono coesistere e come adeguare il sistema per fare in modo che si riesca a rimanere dentro questi confini.

Per la maggior parte dei materiali da costruzione, l'acqua, sotto forma di vapore e non, risulta essere la causa dei principali problemi per l'edificio. Una volta depositata sulle superfici, può portare alla formazione di muffe e al conseguente pericolo per gli occupanti. L'aumento di umidità all'interno di un'abitazione è del tutto normale; la presenza di persone, i panni stesi, fare una doccia o cucinare sono tutte attività che influiscono sulla quantità di vapore presente e, senza un'opportuna areazione degli ambienti, possono portare a formazioni biologiche sulle pareti. Oltre ai sistemi di ventilazione e ricambio d'aria tramite apertura delle finestre, una parte dell'aria umida viene esportata per diffusione attraverso i muri a causa delle differenti pressioni parziali di vapore. Per questo motivo è anche importante comprendere come e perché possano traspirare le partizioni, per favorirne la traspirabilità e comprendere in che modo l'umidità si deposita al loro interno generando i principali problemi di degradazione del materiale.

Durante la ricerca di informazioni riguardanti le strutture in paglia è possibile evidenziare come nella letteratura esistente, gli autori si limitino a descrivere le principali proprietà di questo materiale, non trattando il problema della durabilità legata al degrado e limitandosi a citazioni di regole empiriche che spiegano le basi per evitare la formazione di umidità, senza trattare nel dettaglio il vero e proprio collegamento tra il decadimento della paglia e il comportamento dell'umidità all'interno dei muri.

4.1 Microorganismi e condizioni sfavorevoli

I microorganismi che prosperano sui semi, sugli steli e sulle foglie della pianta restano vincolati ad essa durante il raccolto e vengono inevitabilmente imballati e infine immagazzinati all'interno del muro. La paglia, a causa del contenuto di azoto relativamente basso (rapporto ottimale tra carbonio e azoto: da 1/20 a 1/40; rapporto nella paglia: da 1/70 a 1/120), non viene considerata un nutriente ottimale per le miscele di compost, questo la rende meno soggetta alla rapida crescita di microorganismi che favorisco alla sua decomposizione. Nonostante questo, però, durante la vita utile dell'edificio, se sottoposti a condizioni particolari, possono portare alla formazione di specie fungine e al deterioramento del materiale. Per questo motivo, per un qualsiasi produttore è di fondamentale importanza anche il luogo e le condizioni di raccolta della "materia prima". In ogni caso però, una volta all'interno del muro, grazie alla presenza di un rivestimento protettivo e al mantenimento di determinate condizioni, la paglia dovrebbe trovarsi in un luogo che riesce a prevenire il suo decadimento. La maggior parte dei danni rilevati sulle balle all'interno degli edifici sono però causati dai particolari difetti di progettazione. Durante la costruzione di un edificio in paglia è quindi di fondamentale importanza l'attenzione ai dettagli costruttivi, per prevenire le infiltrazioni di umidità e ridurre l'apporto di ossigeno. [47] La disponibilità di ossigeno può essere infatti considerata un altro dei fattori che influenzano la crescita microbica. Essendo organismi viventi, la maggior parte dei funghi e dei batteri necessita della presenza di ossigeno per respirare durante il consumo del cibo e delle energie presenti all'interno degli steli. Esso può quindi può facilitare il decadimento della paglia, infatti, il processo di decomposizione aerobica risulta piuttosto rapido se sono presenti determinate condizioni di temperatura e umidità. All'interno delle partizioni in paglia questo però non dovrebbe accadere; grazie alla presenza degli strati più esterni, la quantità di ossigeno diminuisce rapidamente e al suo posto viene immagazzinata anidride carbonica, generata dalla fase di respirazione dei microorganismi presenti. Restano quindi il livello e la durata di temperatura e umidità le cause principali di crescita di funghi e organismi sulla materia organica morta.

Per riassumere, è possibile definire la quantità di nutrienti e la disponibilità di ossigeno come due parametri che non variano una volta posizionata la balla di paglia nel muro. In compenso, la temperatura e l'umidità non seguono lo stesso principio e, durante la vita dell'edificio, continueranno a cambiare a seconda dell'ambiente interno ma soprattutto di quello esterno e dei fenomeni atmosferici a cui la partizione sarà sottoposta.

Prima di individuare le soluzioni da adottare per mantenere le balle nelle condizioni ideali, è importante identificare quelle che sarebbero invece dannose per la vita utile della struttura e che potrebbero portare a un rapido processo di degrado. In base a quanto evidenziato dalla letteratura, [48] il maggior quantitativo di funghi e batteri che si trovano all'interno delle balle di paglia, trovano le condizioni ideali per sviluppare la loro crescita quando si trovano in un intervallo di temperatura compreso tra i 20 e i 65 °C. Sotto zero la vita dei microorganismi è impedita dal passaggio dell'acqua allo stato solido, tra gli zero e i 20°C

resta piuttosto limitata la percentuale di specie in grado di sopravvivere e anche sopra i 65°C la temperatura risulta troppo elevata per permettere la formazione di specie fungine. Per quanto l'intervallo ideale possa leggermente variare in base alla specie di microorganismo considerato, la sua influenza è anche strettamente legata ai livelli di umidità nel materiale. In base a quanto riportato da Summers et al. all'interno di uno studio della decomposizione aerobica della paglia a seconda del contenuto di umidità del materiale, la crescita microbica comincia a diventare "rilevante" quando il contenuto di umidità risulta maggiore del 27% su base secca e 21% su base umida. La paglia portata ad un contenuto di umidità superiore al 40% su base secca (28% umida) presenta invece una crescita significativa. Quest'ultimo valore rappresenta il momento in cui la fibra di paglia è satura e l'accumulo di ulteriore umidità avviene sulla superficie esterna degli steli. La velocità di sviluppo dei microorganismi risulta infatti da 50 a 200 volte superiore rispetto a quella della paglia mantenuta al di sotto di questa soglia. Quando le balle si trovano in una condizione di saturazione la crescita risulta molto rapida, e basta una lieve diminuzione di umidità per rallentare notevolmente lo sviluppo. Per garantire l'assenza totale di deterioramento della paglia viene indicato il valore di 15% [49] come contenuto di umidità limite accettabile, che può essere superato solo per un periodo limitato senza causare problemi.

È importante ricordare che la paglia è un materiale igroscopico, come il legno e la maggior parte dei materiali a base biologica, e che, a causa del suo complicato sistema di pori, tende ad attirare le molecole d'acqua sotto forma di vapore che sono presenti nell'aria. Di conseguenza il mantenimento delle condizioni ottimali resta la soluzione migliore in quanto, con il superamento di questi limiti, lo stelo immagazzinerà molto rapidamente molecole d'acqua al suo interno. Con un controllo accurato del contenuto di umidità, infatti, una struttura in paglia ha la capacità di durare quanto qualsiasi altro edificio realizzato con materiali convenzionali.

4.2 Analisi sperimentale

In questa sezione verranno individuati differenti test presenti in letteratura ed effettuati negli anni per valutare gli effetti del contenuto di umidità e della variazione di temperatura sulla paglia.

Nel 2003, nell'Università Californiana di Davis, Bryan Jenkins insieme a suoi collaboratori ha effettuato uno studio per valutare le condizioni di degrado in campioni di paglia di riso. Per valutare il livello di degrado il più accuratamente possibile, è stato scelto di riporre i campioni di paglia all'interno di contenitori sigillati, in modo da poter monitorare la variazione di concentrazione di CO₂ al loro interno. La conversione di ossigeno in anidride carbonica corrisponde alla scomposizione del carbonio dalla cannuccia da parte dei microorganismi. Di conseguenza, la quantità di CO₂ presente permette di monitorare in modo accurato il tasso di perdita di carbonio nella paglia, che corrisponde direttamente al tasso di degradazione del campione. Più è repentino l'aumento di CO₂, più è rapida la perdita

4. Il problema della durabilità

di materia e più il materiale si sta degradando velocemente. Questo processo comporta lo scolorimento del campione, visibile ad occhio nudo, l'aumento della temperatura e la produzione di composti odorosi. Sono stati svolti esperimenti su differenti campioni per analizzare gli effetti in diverse condizioni di umidità. Il campione di paglia è stato prelevato dal campo ed essiccato fino a raggiungere il 12% di umidità a base secca, per poi essere chiuso nei differenti contenitori con differenti condizioni e lasciato sviluppare per diversi mesi. Prima di essere inserita nei differenti contenitori, la paglia è stata inumidita, passando da campioni con contenuti di umidità del 12% a base secca fino ad arrivare ad alcuni con il 150%. A questo punto i contenitori sono stati conservati a temperature differenti: 10°C, 20°C e 35°C. Per due settimane sono stati lasciati decomporsi, monitorando costantemente la variazione di CO₂. Al termine dell'esperimento è stato possibile riscontrare che lo sviluppo di anidride carbonica in ogni contenitore risultava costante e, più aumentavano il quantitativo di umidità e di temperatura e più veniva generata CO₂. [48] In due settimane è stata ottenuta una percentuale di decomposizione giornaliera inferiore allo 0,009% per i campioni con un contenuto di umidità inferiore al 39%. Se il degrado fosse costante nel tempo, per questi campioni si otterrebbe una diminuzione del 3% della materia ogni anno. Per quanto relativamente alto, è importante ricordare che tale valore, con il passare del tempo e con la decomposizione delle materie organiche altamente degradabili presenti nel campione, tende a zero. Questi risultati portano a sostenere l'ipotesi che la sola umidità, se mantenuta all'interno di limiti accettabili, non possa generare una decomposizione significativa nel materiale, consentendo un mantenimento degli elementi in paglia di un edificio per più di 50 anni. È importante sottolineare che, in caso di elevati livelli di umidità, potrebbero iniziare processi di condensazione nella parete, che potrebbero velocizzare il processo di degrado.

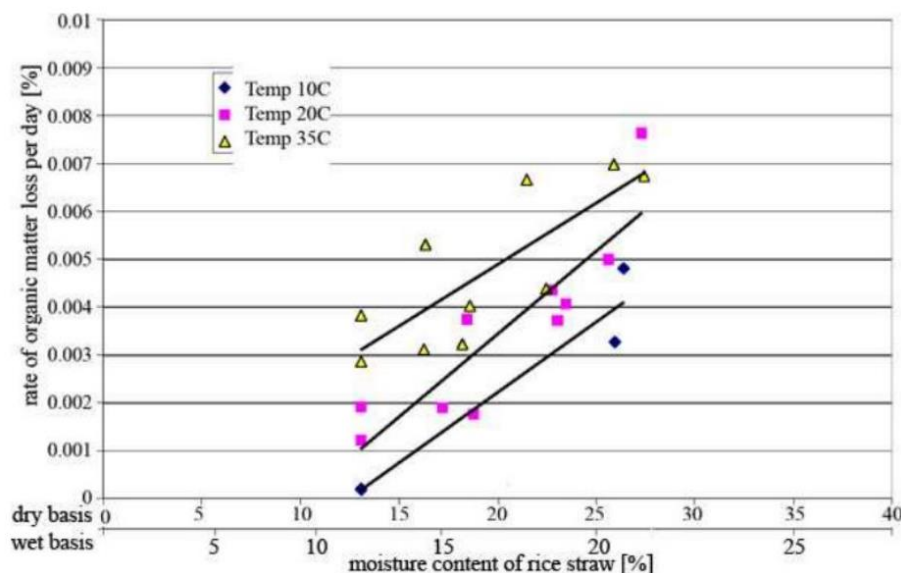


Figura 4.1: Tasso di decomposizione nei campioni di paglia con umidità inferiore al 39%

Nei campioni con un tasso di umidità maggiore al 39%, in cui quindi la fibra di paglia è del tutto satura e su di essa è presente umidità libera, il tasso di decomposizione è aumentato notevolmente. Analizzando la paglia sottoposta a contenuti di umidità tra 40% e 150% è infatti stata evidenziata una riduzione di materia organica giornaliera tra lo 0,5 e il 2%, arrivando a una velocità di decomposizione pari a circa 200 quella analizzata nei primi campioni. Con un quantitativo di umidità così elevato, mantenuto per periodi di tempo significativi, non sarebbe quindi possibile realizzare partizioni in paglia a causa del degrado elevato della stratigrafia e della perdita delle proprietà isolanti del materiale. [50]

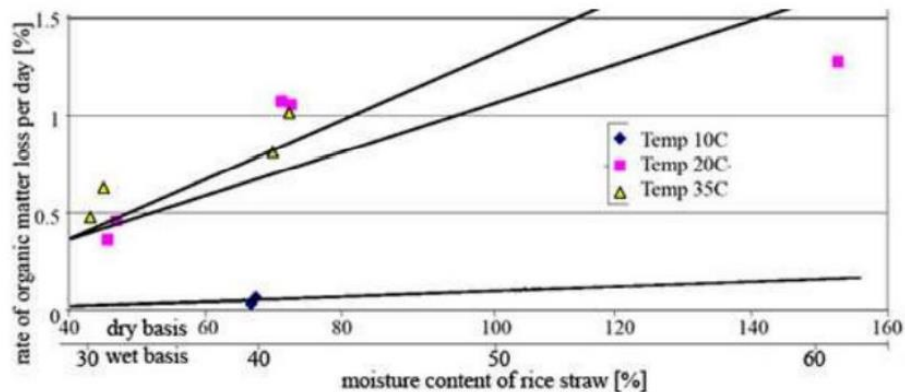


Figura 4.2: Tasso di decomposizione nei campioni di paglia con umidità superiore al 39%

Nel 2009, [49] Lawrence M., Heath A. e Pete W. hanno effettuato uno studio per monitorare il contenuto di umidità in una costruzione in paglia, sviluppando un'equazione empirica che mettesse in relazione il contenuto di umidità nella paglia e l'umidità relativa e la temperatura del microclima esterno. Essa è stata studiata onde evitare interventi invasivi sull'edificio per il monitoraggio delle sue condizioni interne. Infatti, per quanto la misurazione diretta, pesando un campione di materiale, asciugandolo successivamente in forno a 105°C e ripesandolo poi, sia la più accurata, necessita la rimozione di materiale e risulta essere molto invasiva. Per questo motivo viene generalmente utilizzata una misurazione indiretta in grado di ottenere risultati piuttosto accurati senza intaccare la partizione. Durante questo studio si è quindi cercato di semplificare il metodo di misurazione indiretta cercando un collegamento diretto tra le misurazioni effettuate nell'ambiente esterno e l'umidità della paglia. Inizialmente sono state ricavate le relazioni isotermitiche per i campioni di paglia utilizzati; dopo averli essiccati per ottenere la massa secca e averli posti negli appositi contenitori con la soluzione salina scelta per ottenere differenti contenuti di umidità, sono stati inseriti in un forno scientifico e al loro interno sono stati posizionati i sensori per calcolare la temperatura e l'umidità relativa. Dopo aver raccolto i risultati dei test, partendo dall'equazione utilizzata fino a quel momento di Hedlin è stata sviluppata la seguente equazione:

$$C = \frac{C_s}{1 + n \left(\frac{K_m}{\phi} - 1 \right)^{1/3}}$$

Se applicata a una situazione reale con condizione di un'umidità relativa del 85% permette di calcolare il corrispondente contenuto di umidità nella paglia, che è pari al 25%, ovvero il livello che porta all'inizio del processo di degrado del materiale e, di conseguenza, permette di calcolare indirettamente l'umidità nella balla attraverso i valori di temperatura e umidità dell'ambiente circostante.

Per valutare la possibilità di utilizzo di materiali di scarto dell'agricoltura negli edifici, anche Viel M., Colletto F., Lecieux Y. e altri ricercatori, hanno studiato un protocollo per poter valutare come dei materiali compositi a base biologica, come la paglia, resistessero alla contaminazione da muffe. Per realizzarlo hanno eseguito un test di invecchiamento accelerato su cinque provini realizzati con compositi differenti: leganti di diversi mischiati con due risorse agricole. Per ottenere una velocizzazione del processo, i campioni sono stati esposti per tre mesi a una temperatura di 30° con umidità relativa del 90% e sono stati monitorati costantemente per valutare lo sviluppo di muffe e il degrado al loro interno. [42]

Un altro studio interessante è stato condotto da Thomson e Walker [51], che hanno cercato di comprendere se lo sviluppo di muffe all'interno delle pareti in paglia diminuisse dopo la colonizzazione iniziale. Sono stati eseguiti due esperimenti in cui i campioni utilizzati sono stati esposti ad elevati livelli di umidità. In una delle due prove sono stati messi a confronto un campione di paglia fresca e uno di paglia rimossa da una partizione dopo tre anni dalla posa in opera. Quest'ultima, seppur prelevata da un edificio, si presentava scolorita ma non degradata in modo significativo. Nell'altra sono stati presi sei differenti campioni di paglia fresca e sono stati sottoposti a due differenti cicli di elevata umidità per testare se la velocità della colonizzazione fungina durante il secondo si riducesse. Tutti i campioni di entrambe le prove, per garantire che all'inizio del test avessero lo stesso contenuto di umidità, sono stati conservati in condizioni di umidità relativa al 70% e a una temperatura di 20°C per sette giorni. Durante la prima delle due prove due campioni sono stati testati a una temperatura di 21,5°C con un'umidità relativa dell'87%. Per controllare la crescita microbica durante il test, sono stati costantemente monitorati i livelli di anidride carbonica all'interno dei contenitori. I risultati hanno mostrato che per il campione con all'interno la paglia invecchiata tre anni non è stata sviluppata nessuna ulteriore crescita microbica, mentre per la paglia fresca è stato registrato un aumento della concentrazione di CO₂ piuttosto rapido. Nel secondo esperimento i sei campioni sono invece stati sottoposti a differenti condizioni igrometriche, analizzando per ciascuno di essi l'impatto che potesse avere un'esposizione ciclica della paglia a livelli elevati di umidità. Dopo una prima esposizione di 28 giorni ad un'umidità elevata i provini sono stati nuovamente essiccati e posti per 7 giorni a 20°C e 70% di umidità, prima di essere esposti nuovamente. La seconda esposizione è durata 14 giorni e ciascun provino è stato riportato alle condizioni di umidità presenti durante la prima. Anche in questo caso i risultati hanno confermato l'ipotesi iniziali: la crescita di muffa nei provini durante la seconda esposizione è diminuita in modo drastico dopo la crescita iniziale a causa dell'elevata esposizione all'umidità del primo ciclo.

Come è stato possibile evidenziare, l'interesse e la ricerca su quello che sembra essere il più grande limite della paglia stanno sempre più prendendo piede e, seppur con risultati talvolta contrastanti, è possibile comprendere come questo materiale reagisca alle condizioni critiche a cui potrebbe essere sottoposto nella sua vita all'interno di un edificio. Per ogni tipologia costruttiva e pannello prefabbricato è però necessario studiare delle apposite soluzioni per prevenire le infiltrazioni di umidità e la formazione di muffe che possono portare alla decomposizione del materiale e alla perdita delle prestazioni che esso dovrebbe garantire. All'interno dei prossimi capitoli sarà proprio questo l'argomento su cui verticalizzerà la tesi, studiando un particolare elemento prefabbricato e analizzando le principali criticità che potrebbero intaccarne la durabilità nel tempo.

4.3 Analisi numerica del trasferimento di umidità

Seppur di rilevante importanza, le analisi sperimentali non sono le uniche necessarie per la completa comprensione del trasferimento di umidità all'interno dei materiali a base biologica. Per quanto risulta essere complesso, tale processo richiede l'applicazione di tecniche di analisi numerica. La porosità del materiale, la sua permeabilità, la concentrazione di soluti, la temperatura, la pressione, la geometria del materiale e le sue proprietà termiche sono infatti tutti fattori che possono influenzare la trasmissione di umidità nei materiali biologici. Proprio per questo motivo, quando si svolge un'analisi numerica è necessario prenderli in considerazione tutti se si vuole ottenere una soluzione accurata e rappresentativa del fenomeno che si sta analizzando. In generale quindi, per affrontare questo particolare fenomeno, è necessario affidarsi a modelli matematici che descrivano il trasporto di umidità nei materiali e che possano essere risolti utilizzando tecniche di analisi numerica.

4.3.1 Metodi numerici di analisi

Prima di descrivere i modelli matematici che vengono maggiormente utilizzati è necessario esporre i metodi numerici di analisi che possono essere adoperati per risolverli.

Metodo delle differenze finite

È un metodo usato per risolvere delle equazioni differenziali parziali che descrivono come si diffonde l'umidità in un materiale. Esso consiste nella suddivisione del materiale in una griglia di punti e, in ognuno di essi, viene calcolata la distribuzione di umidità partendo dalle condizioni iniziali e dalle equazioni differenziali che descrivono il flusso dell'umidità nel tempo. Queste ultime variano in base al fenomeno che si sta considerando e comprendono dei termini che descrivono la diffusione dell'umidità, la sua evaporazione e/o condensazione. Il nome di questo metodo deriva dal fatto che la sua applicazione prevede l'approssimazione delle derivate delle equazioni differenziali parziali tramite differenze finite, cioè le differenze tra valori dell'umidità che sono calcolati in punti adiacenti alla griglia. Ciò

permette di ricondurre il problema alla risoluzione di un sistema di equazioni algebriche, che viene risolto attraverso tecniche numeriche.

Metodo degli elementi finiti

Come il precedente, questo metodo viene utilizzato per risolvere equazioni differenziali parziali che descrivono come si diffonde l'umidità in un materiale. A differenza del primo, in questo metodo viene eseguita una suddivisione del materiale in un insieme di elementi finiti. Ognuno degli elementi può essere descritto da un insieme di nodi e da una funzione di interpolazione che va ad approssimare come avviene la distribuzione dell'umidità in quel singolo elemento. Basandosi sulle equazioni differenziali che descrivono la diffusione dell'umidità, con questo sistema si vanno a calcolare i differenti valori di umidità in ogni nodo della griglia. Ciò viene ottenuto attraverso la discretizzazione, con funzioni che approssimano la distribuzione di umidità in ogni elemento finito, delle equazioni differenziali parziali in equazioni algebriche che, anche in questo caso, vengono poi risolte con tecniche numeriche.

Metodo dei volumi finiti

Anche in questo caso avviene una discretizzazione dell'elemento in un insieme di celle finite. In ogni cella viene poi approssimata la soluzione dell'equazione differenziale utilizzando un polinomio di grado basso. Successivamente le equazioni ricavate vengono risolte utilizzando metodi numerici. Questo metodo può essere quindi utilizzato per modellare il flusso di umidità attraverso un materiale: vengono prima risolte le equazioni di diffusione di umidità di ciascuna cella e con le soluzioni viene calcolato il flusso tra le celle.

Data la complessità di tali metodi, per la loro applicazione è necessario conoscere dettagliatamente le proprietà fisiche e chimiche del materiale analizzato e le condizioni ambientali in cui tale processo di trasmissione potrebbe avvenire.

4.3.2 Metodi matematici

Esistono diversi modelli matematici per sviluppare l'analisi numerica del trasporto di umidità attraverso i materiali biologici. Di seguito verranno evidenziati i più utilizzati. La scelta del modello dipende dalle proprietà del materiale e dagli obiettivi dell'analisi numerica

Modello di sorzione

Per spiegare in cosa consiste il modello di sorzione è necessario definire di cosa si tratta la sorzione stessa. Essa può essere brevemente definita come il processo di assorbimento e desorbimento di acqua da un materiale, a seconda dell'umidità relativa dell'ambiente

circostante. Esistono diversi modelli di sorzione che possono essere utilizzati per descrivere come si comportano i materiali biologici in presenza di umidità:

- *Modello di sorzione di Guggenheim-Anderson-de Boer (GAB)*

Esso si basa sulla teoria dell'assorbimento fisico di Langumuir e descrive il processo di sorzione dell'umidità come l'assorbimento dell'acqua su una superficie solida, in cui essa va a creare uno strato di molecole d'acqua che si legano alla superficie del materiale su cui si trovano. L'umidità che viene assorbita dal materiale si ricava dall'equilibrio tra l'umidità relativa e la forza motrice del processo di assorbimento. Attraverso una funzione della pressione parziale dell'UR, della temperatura, della costante di GAB e dell'energia di assorbimento (due parametri del materiale), viene descritta la sorzione di umidità. La formula utilizzata è la seguente:

$$m = m_0 * k * p / (1 - k * p + k * p * (a - 1) / (b + (a - 1) * p))$$

in cui:

- m = quantità di acqua adsorbita dal materiale;
- m_0 = quantità massima di acqua che il materiale può adsorbire;
- k = costante di GAB (descrive la forza del processo di adsorbimento);
- p = pressione parziale umidità relativa;
- a e b = parametri di energia di adsorbimento del materiale

- *Modello di sorzione di Henderson*

Come il precedente, il modello di Henderson si basa sulla teoria dell'assorbimento fisico di Langumuir e descrive il processo di sorzione dell'umidità come l'assorbimento dell'acqua su una superficie solida. L'umidità assorbita dipende sempre dalla pressione parziale, dall'UR e dalla temperatura dell'ambiente e dalle proprietà del materiale. La formula utilizzata è la seguente:

$$X = k * ((P / P_s)^n) / (1 + k * ((P / P_s)^n))$$

In cui:

- X = quantità di acqua adsorbita dal materiale;
- P = pressione parziale dell'umidità relativa dell'ambiente circostante;
- P_s = pressione di saturazione dell'umidità del materiale a una determinata temperatura;
- k = coefficiente di sorzione di Henderson;
- n = fattore di eterogeneità di Henderson.

4. Il problema della durabilità

- *Modello di sorzione con l'equazione di Kelvin-Voigt*

A differenza dei precedenti, tratta di un modello viscoelastico che viene anche utilizzato per definire la sorzione di umidità nei materiali biologici. Questo modello può essere risolto con i tre metodi numerici di analisi visti nel paragrafo precedente. Esso tiene conto della relazione tra la sorzione del materiale (capacità di assorbimento dell'acqua) e la sua viscoelasticità (capacità di deformazione sotto l'effetto dell'acqua). Tale deformazione dipende in sia dal tempo di sorzione che dalle proprietà viscoelastiche del materiale. Esso viene spesso utilizzato per descrivere la trasmissione di umidità in materiali porosi come la paglia. Questo modello si basa sull'equazione di Fick, che definisce la diffusione di una sostanza in un materiale poroso: $\partial C/\partial t = D \nabla^2 C$ (C =concentrazione di umidità); t = tempo; D = coeff. di diffusione; ∇^2 = Operatore di Laplace). Per considerare la relazione descritta precedentemente, il modello di Kelvin-Voigt inserisce un termine viscoelastico all'interno dell'equazione, in modo da considerare anche la deformazione del materiale sotto l'effetto dell'umidità. L'equazione diventa quindi:

$$\partial C/\partial t = D \nabla^2 C + k \nabla^2 \varepsilon$$

In cui:

- ε = deformazione del materiale;
- k = coefficiente di elasticità del materiale
- ∇^2 = operatore di Laplace.

Modello di diffusione

Anche questo metodo descrive come si diffonde l'umidità in un materiale. Questo metodo si basa sull'equazione di Fick vista nel modello di Kelvin-Voigt. La principale differenza tra i due risulta quindi essere che il primo non considera l'effetto che può avere l'acqua sulla struttura del materiale, cosa che invece fa il secondo, rendendolo più preciso. L'equazione di Fick è la seguente:

$$\partial C/\partial t = D \nabla^2 C$$

In cui:

- C = concentrazione di umidità
- t = tempo
- D = coeff. di diffusione
- ∇^2 = Operatore di Laplace

Per risolvere questa equazione bisogna applicare una delle tecniche di analisi numerica viste in precedenza, suddividendo lo spazio in una serie di punti e il tempo in una serie di passi, e approssimando la concentrazione di umidità in ogni punto della griglia.

Modello di Conduzione

Viene utilizzato per descrivere la conduzione di calore in un materiale, la quale può influenzare la trasmissione di umidità. Viene descritto attraverso l'equazione del calore, che

mette in relazione la temperatura con la conduttività termica del materiale e il flusso di calore attraverso di esso.

Modello di bilancio idrico

Tale modello rappresenta attraverso un'equazione l'equilibrio tra l'ingresso di umidità nel materiale, l'umidità presente all'interno del materiale stesso e quella persa a causa dell'evaporazione e altre attività metaboliche. Per un risultato più specifico viene spesso esteso con l'utilizzo di altre variabili come temperatura e pressione. Si riporta di seguito l'equazione standard:

$$I = M + S + E + R$$

In cui:

- I = ingresso di umidità nel materiale biologico
- M = umidità presente nel materiale biologico
- S = umidità persa con l'evaporazione
- E = umidità persa con l'evaporazione dalla superficie del materiale biologico
- R = umidità persa attraverso la respirazione o altre attività metaboliche

4.3.3 Analisi della letteratura

La trasmissione di umidità nei materiali a base biologica può essere considerata uno dei principali problemi per le costruzioni edificate con questa tecnica a causa della possibile formazione di muffe che potrebbero portare al degrado del materiale e al crollo delle sue prestazioni. Per questo motivo, gli studi per valutarne l'influenza e i comportamenti sono sempre più frequenti. [52] Jaya Tripathi e Robert W.Rice all'interno di uno studio hanno eseguito una modellazione agli elementi finiti del trasferimento di calore e umidità attraverso pannelli in legno a strati incrociati per valutare le proprietà igrotermiche di pannelli X-LAM. Per eseguire le simulazioni più reali possibili sono stati effettuati diversi esperimenti utilizzando tre pannelli di CLT con composizioni diverse: il primo con tre strati di abete rosso, il secondo con due strati di abete rosso esterni e un LSL centrale, il terzo con i due strati esterni i LSL e il centrale in abete rosso (spessore 3,5 cm ciascuna). I pannelli sono stati inseriti in una camera climatica con umidità e temperatura (4°C) controllate, così da mantenere per tutto il tempo necessario l'interno della camera caldo e umido e l'esterno fresco e asciutto, in modo da far fluire l'umidità e l'energia termica dalla zona interna a quella esterna. Per la creazione del modello, realizzato con un software poliedrico (modello agli elementi finiti), sono state considerate le condizioni al contorno misurate durante gli esperimenti e ai materiali sono stati assegnati i parametri reali relativi al trasferimento di calore (conducibilità termica, densità, calore specifico), inoltre, per risultati più specifici, i valori del coefficiente di diffusione sono stati adattati ai valori variabili della temperatura e dell'energia di attivazione secondo l'equazione di Arrhenius. Dopo aver inserito tutti i valori relativi al trasferimento di umidità si è eseguita la simulazione, i cui risultati sono stati confrontati con quelli calcolati dai sensori utilizzati nella camera climatica. I valori ottenuti hanno dimostrato che i risultati simulati corrispondevano bene a quelli della simulazione, evidenziando che la concentrazione di umidità era più alta nel pannello con l'abete rosso-

4. Il problema della durabilità

LSL-abete rosso piuttosto che in quello LSL-abete rosso-LSL, mentre in quello con solo abete rosso, il valore si trovava nel mezzo tra i due.

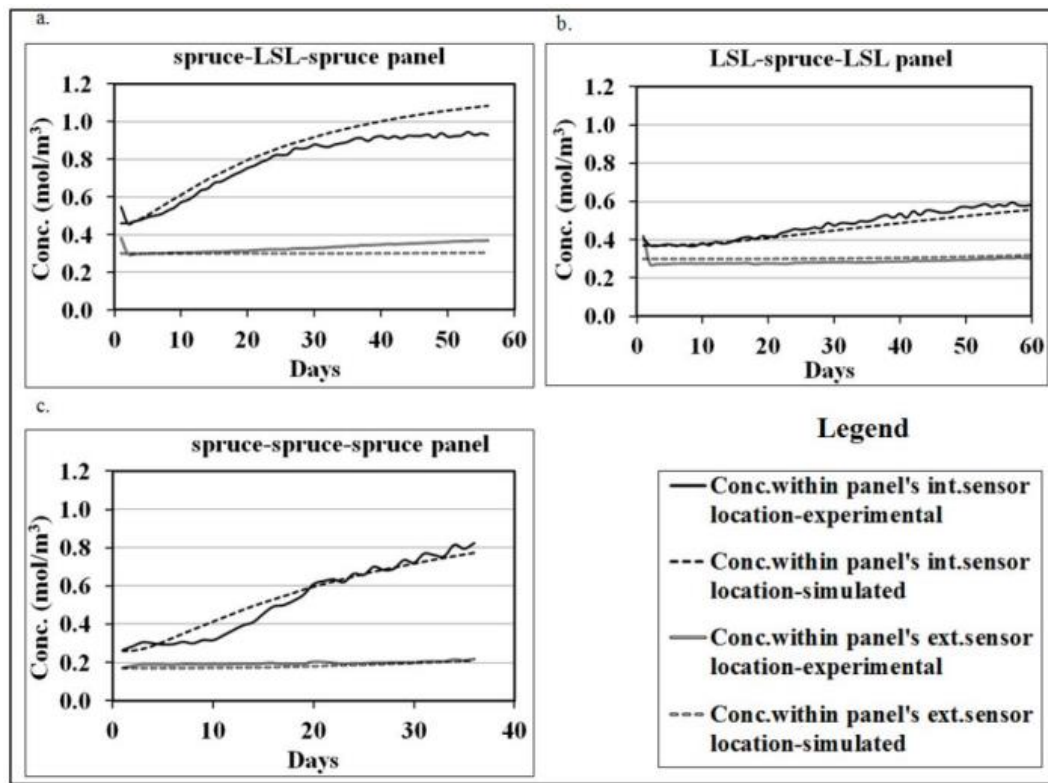


Figura 4.3: Confronto concentrazioni di umidità sperimentali e simulate

Questo tipo di analisi spesso interessa i materiali biologici che si stanno affacciando negli ultimi anni nel mondo dell'edilizia o, come la paglia, stanno ritornando ad essere utilizzati in modo consistente. [36] Tarek Alioua et al. hanno utilizzato due modelli matematici per descrivere il trasferimento di umidità e calore per comprendere il comportamento igrometrico di un nuovo materiale a base biologica, realizzato con calcestruzzo di palma di datteri. Anche in questo studio sono stati confrontati i risultati sperimentali con quelli analitici ottenuti tramite il metodo degli elementi finiti. La parete, di spessore 15 cm, è stata quindi posizionata in una camera climatica, all'interno della quale sono stati studiati diversi scenari di variazione climatica. Il primo consiste in una variazione di temperatura, da 23°C a 40°C, iniziale, seguita da 4 cicli di caldo freddo (da 40°C a 18°C) a livello di umidità costante (50%). Il secondo con una la stessa variazione iniziale del primo e la successiva esposizione per 3 giorni a 40°C con 50% di UR. Il terzo con una prima variazione graduale di umidità da 23% a 75%, seguita da un'esposizione di 9 giorni con temperatura a 23°C e UR costante al 75%, e conclusa con un'altra variazione di UR da 75% a 33%, mantenuta poi per altri 9 giorni. I due modelli matematici utilizzati per valutare il trasferimento di calore e umidità sono stati quello di Mendes e il Modello Kunzel. Questi sono quindi stati implementati nel software COSMOL per risolvere le equazioni alle derivate parziali attraverso il metodo degli elementi finiti; partendo dall'accumulo di dati ricavati dai sensori presenti nei test sperimentali sono state definite le condizioni al contorno e le proprietà dei materiali per rendere il confronto il più dettagliato possibile. Le simulazioni sono state

eseguite sulla base della curva di adsorbimento di ciascun modello matematico e i risultati sono stati confrontati per tre differenti profondità.

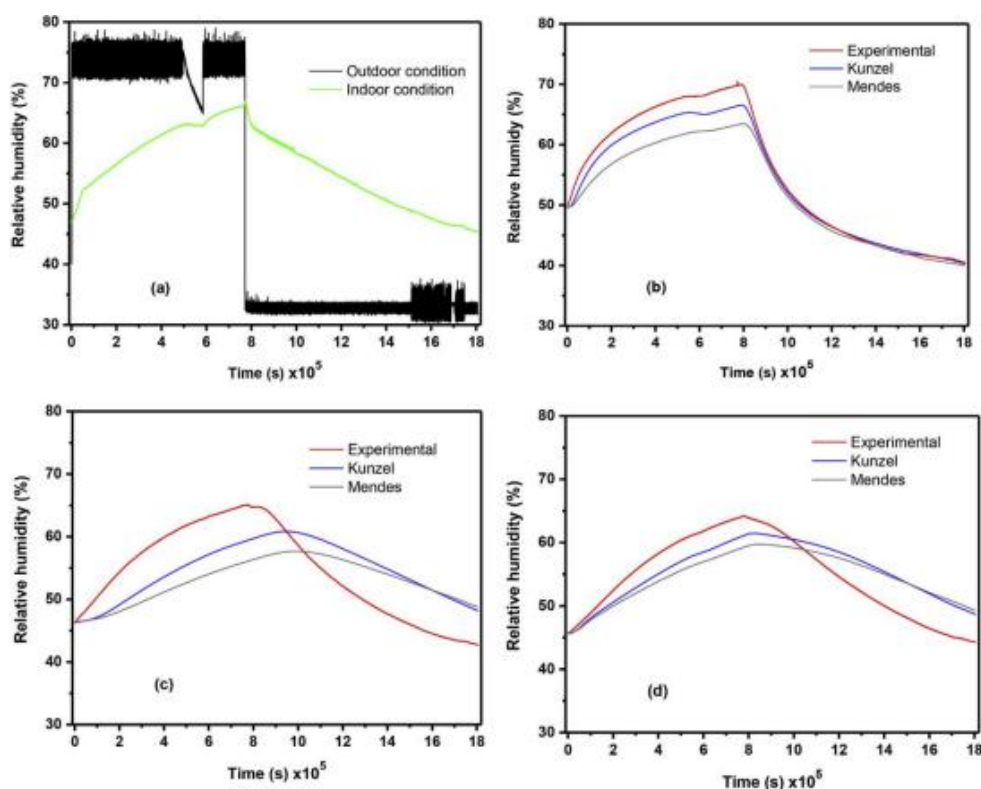


Figura 4.4: Confronto risposte di UR sperimentali e numeriche scenario 3 a profondità di 3/7,5/12,5 cm

Dal confronto è possibile notare che il modello di Mendes evidenzia valori di UR inferiori a tutte le profondità. Tale variazione è dovuta alla minor precisione nel modello di Mendes nella descrizione specifiche del processo di trasferimento di liquidi. Kunzel utilizza infatti coefficienti di trasferimento specifici per tener conto di tutti i possibili fenomeni di trasporto del liquido come diffusione superficiale, capillarità, aspirazione e redistribuzione. Entrambi i modelli invece si trovano comunque sotto quello ottenuto sperimentalmente in fase di assorbimento e sopra in quella di desorbimento. Ciò potrebbe essere dovuto sia alla difficoltà nello stabilizzare i campioni nella camera climatica, sia nella rapidità di risposta nella fase sperimentale rispetto a quella analitica. Un altro importante fattore che può avere influenzato tali risultati è l'effetto di isteresi, che non viene considerato nei due modelli utilizzati. Ciò porta a trascurare l'acqua trattenuta durante i processi di adsorbimento/ desorbimento e ha un'influenza significativa sull'evoluzione prevista dell'umidità relativa. Per questo motivo si sono ripetute le stesse simulazioni ma tenendone conto nei calcoli: si è utilizzato il modello di isteresi di Mualem implementato con il modello di Kunzel. Come è possibile notare, i risultati sono molto più simili ai reali considerando tale effetto.

4. Il problema della durabilità

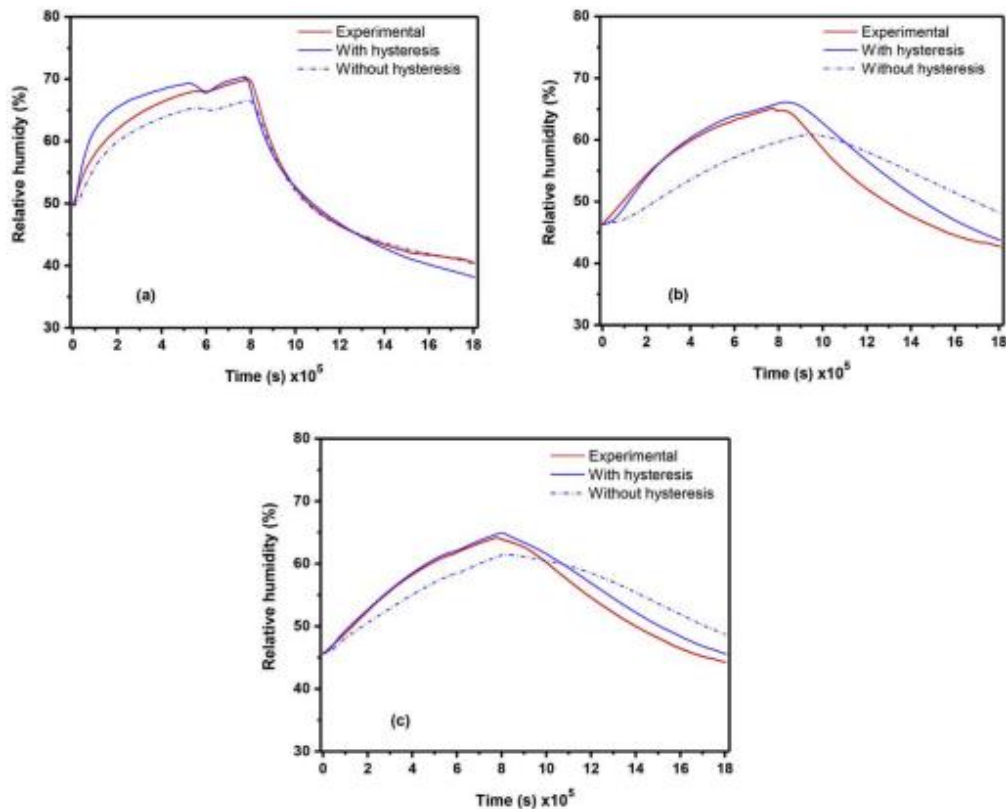


Figura 4.5: Confronto risposte di UR sperimentali e numeriche scenario 3 con e senza isteresi

[53] Falza Mnasri et al. hanno cercato di prevedere il comportamento igrotermico di un pannello in legno massiccio attraverso l'utilizzo dell'analisi numerica. In questo caso è stato proposto un modello di trasferimento HAM, basato sulla teoria di Luikov, che, all'interno dell'analisi, prende in considerazione una lastra di legno di spessore 2,4 cm, le cui proprietà fisiche da inserire nell'analisi sono state ricavate da dei precedenti studi sperimentali. Essendo un materiale poroso, il legno utilizzato viene considerato composto di matrice solida e pori, all'interno dei quali si può trovare umidità in fase liquida e vapore. Per questo motivo, nell'equazione di bilancio di massa verranno considerate entrambe le due fasi, che si muovono nel legno grazie alle forze capillari per il trasferimento del liquido e la diffusione del vapore.

Il flusso del liquido viene descritto dal minimo di Darcy:

$$J_l = -k_l \rho (\nabla w - \delta_l \nabla T) - \alpha_l \nabla P$$

Il flusso del vapore viene invece governato da Fick che, come visto in precedenza, considera gli effetti della tensione del vapore e quelli della pressione dell'aria:

$$J_v = -D \nabla \rho_v - \alpha_v \nabla P$$

Anche in questo caso, per la corretta risoluzione delle equazioni del modello considerato si è scelto di utilizzare il Software COMSOL, che utilizza il metodo degli elementi finiti. Il test

è stato effettuato considerando due scale di studio differenti, per le quali sono state considerate le specifiche condizioni al contorno: la prima è la scala del solo materiale (condizioni al contorno di essiccazione del materiale), la seconda è invece la scala di un muro (condizioni al contorno $T = 5^{\circ}\text{C}$ e $UR = 75\%$). Inizialmente l'analisi numerica è stata svolta ipotizzando che tutti i parametri del modello HAM rimanessero costanti nel tempo.

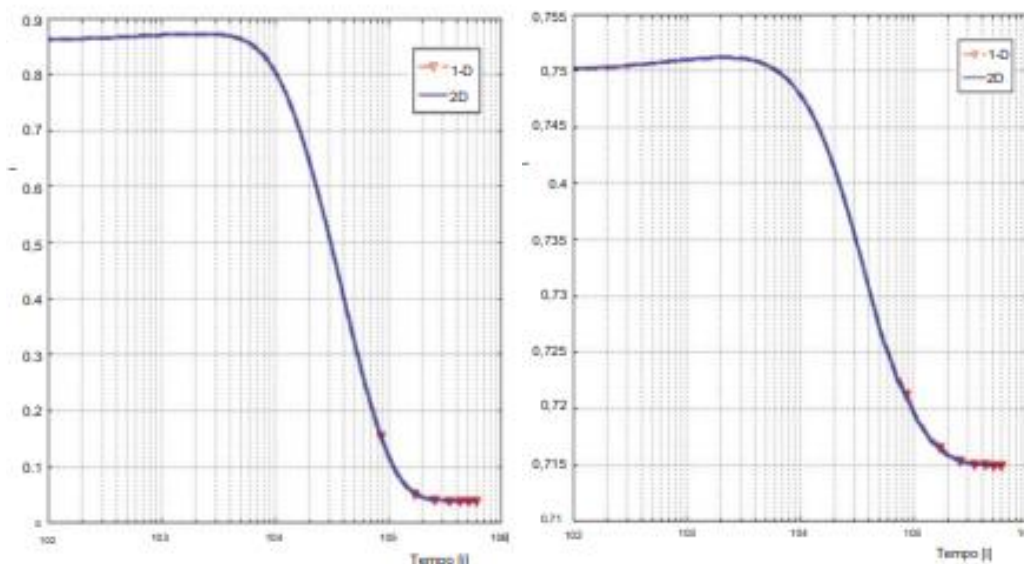


Figura 4.6: Confronto del contenuto di umidità in condizioni di essiccazione (sx) e in condizioni reali (dx)

Una volta ottenuti i primi risultati, l'analisi è stata ripetuta valutando l'impatto della variabilità dei parametri del modello HAM. Per un confronto ottimale sono state mantenute le stesse condizioni al contorno considerate precedentemente. I parametri variabili sono in questo caso la conducibilità termica e il coefficiente di diffusione di umidità.

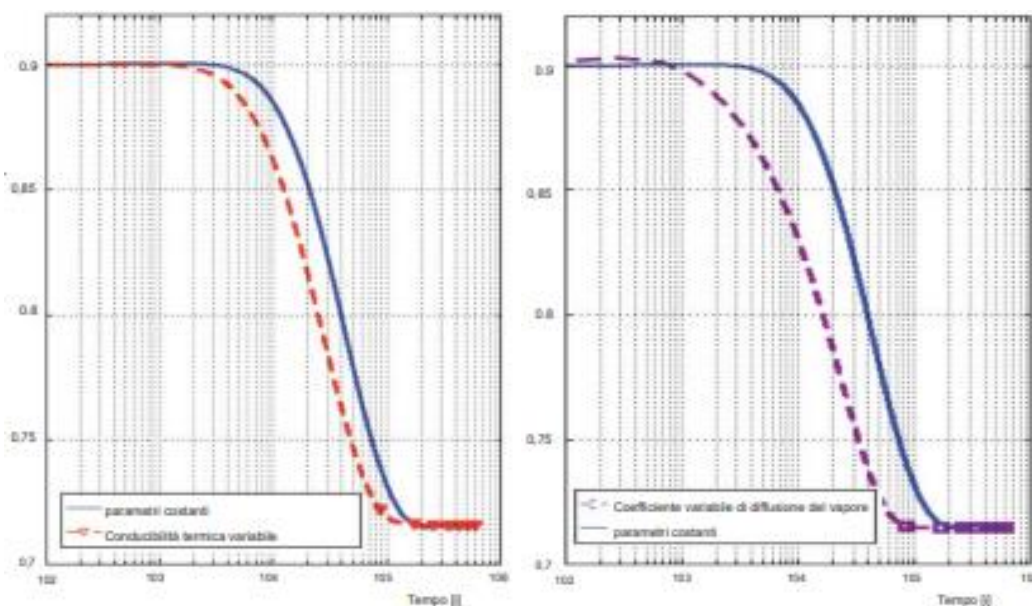


Figura 4.7: Confronto del contenuto di umidità con conducibilità termica e coefficiente di diffusione di umidità variabili e non

4. Il problema della durabilità

Oltre ad evidenziare il comportamento igrometrico del pannello di legno, Mnasri et al., attraverso i risultati della simulazione, hanno quindi evidenziato come il calore e il vapore influenzano la migrazione dell'umidità nell'involucro di un edificio in legno.

Seppur in numero inferiore, alcune analisi numeriche sono state effettuate anche su elementi in paglia. [44] Jelle Langmanahs et al. hanno infatti esaminato le prestazioni igrotermiche di muri di balle di paglia esposte al clima belga. La simulazione numerica effettuata è stata eseguita con lo stesso software che verrà utilizzato nei prossimi capitoli: DELPHIN 5. L'elemento analizzato consiste in un muro di 2,7 metri in palle di paglia di spessore 36cm, con un rivestimento esterno in malta di 3 cm e uno interno in intonaco in terra di 3 cm.

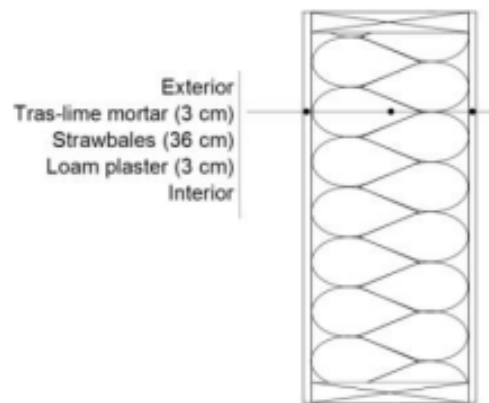


Figura 4.8: Stratigrafia dell'elemento analizzato

Lo studio è stato suddiviso in due differenti fasi: una iniziale in cui sono stati studiati l'impatto del fattore di resistenza alla paglia e l'influenza del livello di UR attraverso simulazioni unidimensionali, una seconda in cui si è verificata l'influenza dei circuiti di convezione naturale dell'aria all'interno della parete in paglia attraverso una simulazione bidimensionale. La prova è stata effettuata per le condizioni climatiche annuali. Nei grafici risultanti dalle simulazioni vengono indagati due parametri: il livello umidità interna e l'impatto del fattore di resistenza al vapore (effettuando variazioni sul tasso di ventilazione). Nell'immagine sono rappresentate in nero le curve che indicano un contenuto di umidità più elevato nella paglia (che si evidenzia con un tasso di ventilazione ridotto), e che quindi generano un maggior rischio di formazione di muffa rispetto alle altre. Per quanto riguarda invece la permeabilità al vapore della cannuccia, più e bassa e minore è il rischio di umidità.

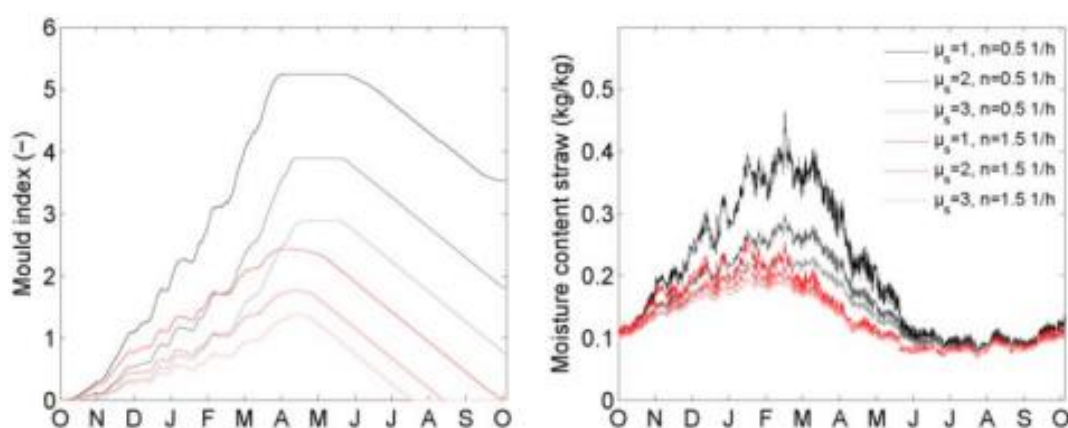


Figura 4.9: Analisi unidimensionale, Indice di crescita di muffa (s_x) e massimo contenuto di umidità della paglia (d_x) [μ_s : fattore di resistenza al vapore della paglia]

Successivamente si è invece analizzato il caso bidimensionale, con un fattore di resistenza al vapore della paglia pari a 1,0 e una velocità di ventilazione di 1,5 1/h. in figura è possibile analizzare i risultati del caso bidimensionale confrontati con quello in cui non veniva considerata la convezione dell'aria. Essendo le balle di paglia relativamente aperte, durante il periodo invernale si instaura un processo di convezione dell'aria che deve essere considerato (il cui flusso convettivo è indicato in figura). Per questo motivo, nella parte alta della parete aumentano sia il contenuto di umidità che il rischio di formazione delle muffe.

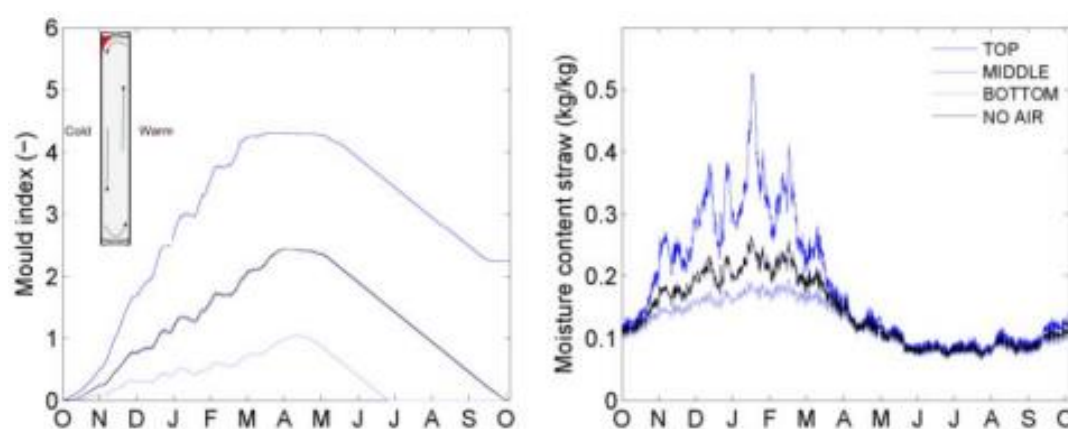


Figura 4.10: Analisi bidimensionale

Lo studio ha quindi rivelato che le pareti in balle di paglia analizzate sono suscettibili alla crescita di muffa se esposte alle condizioni climatiche nel Belgio. Anche in presenza di una buona ventilazione, i flussi convettivi d'aria che ridistribuiscono l'umidità nella parete, aumentano notevolmente il rischio di alti livelli di umidità in alcune parti della stessa. I risultati ottenuti sul campo precedentemente al test mostrano però dei contenuti inferiori rispetto a quelli dell'analisi numerica, indicando che non sempre i risultati delle analisi per materiali di questo tipo rispecchiano in modo inconfutabile ciò che effettivamente può accadere in condizioni reali.

4.4 Come gestire l'umidità negli edifici in balle di paglia

La gestione delle condizioni di vita degli edifici in paglia sono è cruciale per la loro durabilità. Conoscere i livelli di umidità accettabili e sapere come intervenire in caso di superamento degli stessi è indispensabile sia per i produttori che per gli utilizzatori dell'edificio. Si riportano di seguito le “linee guida” individuate nella letteratura disponibile per la conservazione delle balle di paglia utilizzate nel mondo delle costruzioni.

Già durante la fase di realizzazione di un edificio in paglia è importante utilizzare solo balle con un contenuto di umidità su base secca inferiore al 25%, evitando così l'apporto di umidità libera al sistema e mantenendo i livelli di umidità inferiori a quelli necessari ai microorganismi per contribuire alla decomposizione.

Di conseguenza, in caso di condizioni meteo sfavorevoli durante le fasi di trasporto e stoccaggio, è opportuno assicurarsi che le balle siano completamente asciutte prima di posizionarle all'interno della parete. Date le dimensioni delle balle, la condizione superficiale non sempre rispecchia quella al centro della balla; quindi, in casi particolari sarà necessario eseguire dei carotaggi o utilizzare una sonda per il calcolo dell'umidità interna. Anche durante la vita dell'edificio, in casi estremi, a causa di infiltrazioni d'acqua e umidità nel muro, dovute a difetti o deterioramento degli strati di rivestimento, può essere opportuno eseguire appositi test per verificare le condizioni all'interno delle balle e, se deteriorate, provvedere alla sostituzione delle stesse o dell'intero elemento prefabbricato in cui si trovano. Onde evitare il raggiungimento di condizioni critiche che necessitino di queste sostituzioni, oltre all'ordinaria manutenzione sarebbe opportuno monitorare le condizioni igrometriche all'interno delle partizioni con sonde posizionate nelle balle e controllate da remoto in grado di riportare i dati sulla concentrazione di umidità in tempo reale. In caso di registrazione di picchi di umidità all'interno della muratura, sarà opportuno monitorare le condizioni fino a completa asciugatura.

Oltre al contenuto di umidità, anche la temperatura nelle balle può indicare attività di decomposizione; la produzione di CO₂ non è l'unico sintomo del deterioramento del materiale, questo processo genera anche un innalzamento di temperatura all'interno della balla. Le balle con un elevato contenuto di umidità possono arrivare a temperature di 60°C, per poi raffreddarsi nel processo di asciugatura. Anche se all'interno di una partizione l'assenza di ossigeno dovrebbe evitare quasi completamente questo innalzamento, a causa del rischio di combustione spontanea della paglia a temperature superiori a 70°C, è indispensabile evitare il raggiungimento di queste condizioni.

5 PABLOK, un sistema innovativo

Vista la potenzialità dei sistemi costruttivi misti realizzati con legno e paglia, nel tempo, alcune imprese hanno deciso provare di svilupparne differenti tipologie. In questa tesi verrà analizzato nel dettaglio il sistema “PABLOK”, studiato e brevettato dalla società GP Project srl, e impiegato oggi nella realizzazione di diverse strutture sul territorio italiano.

5.1 Da idea a realtà

Partorita dall’Ingegnere Giampaolo Pilloni e dall’architetto Fabio Cova, l’idea di realizzare un sistema prefabbricato che sfruttasse le proprietà isolanti della paglia è nata nel 2014. La visita a differenti cantieri realizzati con un sistema costruttivo simile ha portato alla scelta di studiare un pacchetto innovativo e all’avanguardia, che riuscisse a conciliare la sostenibilità alle elevate prestazioni. Il primo impatto con i cantieri diede infatti la possibilità di analizzare le diverse problematiche che riscontravano i sistemi meno ingegnerizzati di quelli moderni: la disomogeneità delle balle nella fase di posa, la conseguente possibile differenza di prestazioni nella struttura e l’impossibilità nel monitoraggio delle condizioni dell’edificio in opera, hanno subito esposto la difficoltà che un sistema in balle di paglia potesse avere per operare all’interno di un sistema normativo come quello italiano.

“Ho notato che c’era davvero troppa artigianalità nella costruzione ma era estremamente positiva la sensazione di entrare in un cantiere pulito che non avesse il classico odore chimico di cantiere così come l’avevo nella mia memoria fino a quel momento. Ho avvertito da subito una sorta di benessere legato probabilmente alla sensazione di stare in un posto chiuso dove tuttavia la natura si avverte/rispira fortemente”

La particolarità di utilizzare un materiale di scarto agricolo per la realizzazione di edifici a energia zero, che a fine vita potesse essere integrato all’interno di un pannello prefabbricato piuttosto che esser bruciato o sottoutilizzato, ha stimolato la ricerca di qualcosa di nuovo e del tutto innovativo.

Da un’idea, il sistema Pablok è stato successivamente studiato, ingegnerizzato e certificato. Oggi viene impiegato nel mercato delle costruzioni e, all’interno di un involucro in legno

lamellare, porta tutta la bontà di un materiale isolante naturale, completando un sistema realizzato completamente a secco, dalle altissime performance strutturali e isolanti e totalmente green.

Il processo di sviluppo di questa tecnologia ha seguito diversi step prima di arrivare all'elemento che viene applicato oggi in cantiere. Dopo una prima realizzazione del prototipo, nel 2015 GP Project ha iniziato il primo progetto con il sistema prefabbricato Pablok: la realizzazione di due scuole nZEB in classe A4. Nel 2018, stesso anno di completamento degli edifici, è stato rilasciato il brevetto del sistema. Per validare le elevate prestazioni degli elementi, negli anni successivi sono continuati gli studi e le analisi di laboratorio arrivando alla certificazione vera e propria del prodotto:

- Certificazione REI 120;
- Certificato R per calcolo trasmittanza e sfasamento onda termica;
- Certificato Acustico ($R_w = 78$ db per il pacchetto completo di due contro pareti).

5.2 Il pacchetto

Pablok si basa principalmente sull'impiego di due differenti pannelli: Pablok Wall, ovvero il pannello utilizzato per le chiusure verticali, e Pablok Roof, che completa la struttura, essendo impiegato per la realizzazione della copertura. I pannelli prefabbricati sono realizzati attraverso l'applicazione di balle di paglia precomprese e pretrattate, inserite all'interno di telai di montanti e traversi in legno lamellare, completati esternamente da lastre in gesso fibra. L'utilizzo materiali biologici, la prefabbricazione e la struttura completamente a secco garantiscono, oltre alle elevate prestazioni termiche, acustiche, strutturali e sismiche, dei tempi di realizzazione estremamente ridotti. La scelta di utilizzare materiali completamente naturali ed ecosostenibili ha permesso inoltre di abbattere quasi completamente le emissioni di CO₂ e di consentire un risparmio energetico dell'80% inferiore rispetto a quello degli edifici tradizionali.

Analizzando la stratigrafia del pacchetto, è possibile evidenziare sei differenti strati. Partendo dall'interno e andando verso l'esterno si trova prima lo strato in gesso fibra, successivamente, per garantire la traspirabilità della paglia è applicato un telo di freno al vapore che riveste il Sistema Platform Frame realizzato in paglia e legno. Il primo rivestimento esterno dello strato isolante è realizzato in tavolato in legno inclinato di 45°, sul quale è applicata una membrana impermeabile per evitare l'infiltrazione di acqua dall'esterno; a completare il pacchetto viene quindi applicata la finitura esterna.

Stratigrafia Pablok Wall

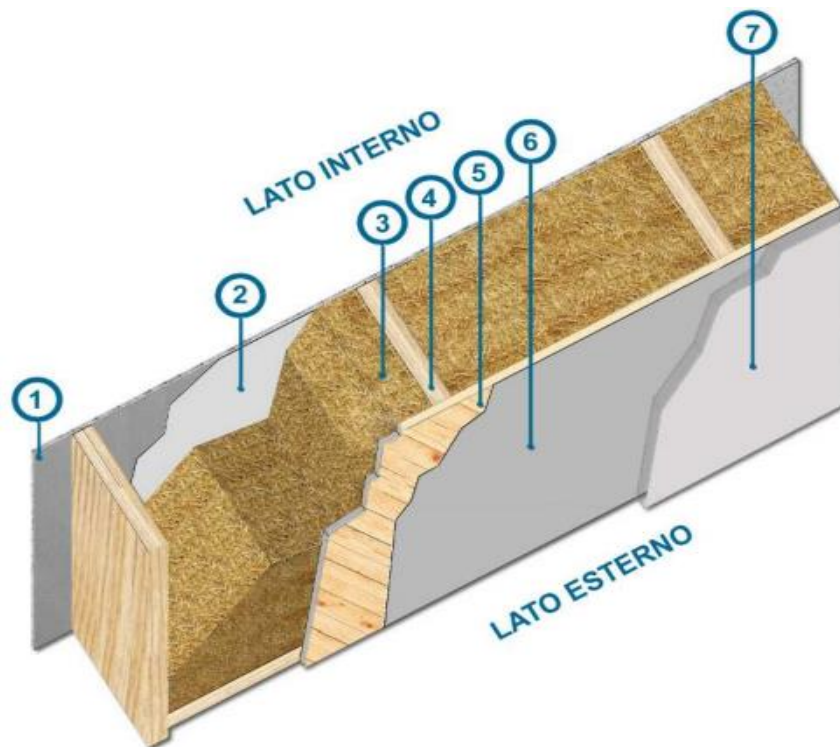


Figura 5.1: Stratigrafia Pablok Wall

- 1) Pannello in Gessofibra di spessore 1,25 cm; finitura realizzata con intonaco a rullo e tinteggiatura; classe di reazione al fuoco secondo 3501-1 non combustibile, A1 – Classificazione secondo EN 15283-2GF-I-W2-C1;
- 2) Membrana freno a vapore;
- 3) Coibentazione eseguita con uno strato coibente in paglia compressa pretrattata dello spessore di 40 cm;
- 4) Sistema Platform Frame costituita da una struttura composta da montanti e traversi lignei collegati tra loro con viti;
- 5) Tavolato in abete maschiato di spessore 2, cm inclinato a 45° e fissato con appositi elementi metallici di sezione e lunghezza adeguata ai montanti e traversi della struttura Platform Frame;
- 6) Telo di tenuta all'acqua TNT traspirante di spessore 0,6 cm con grip antiscivolo e conforme alla norma EN 13859-1;
- 7) Controparete esterna ventilata realizzata con una struttura modulare e lastre cementizie Fermacell Powerpanel H2O idrorepellenti, rasate e tinteggiate

9) Stratigrafia Pablok Roof

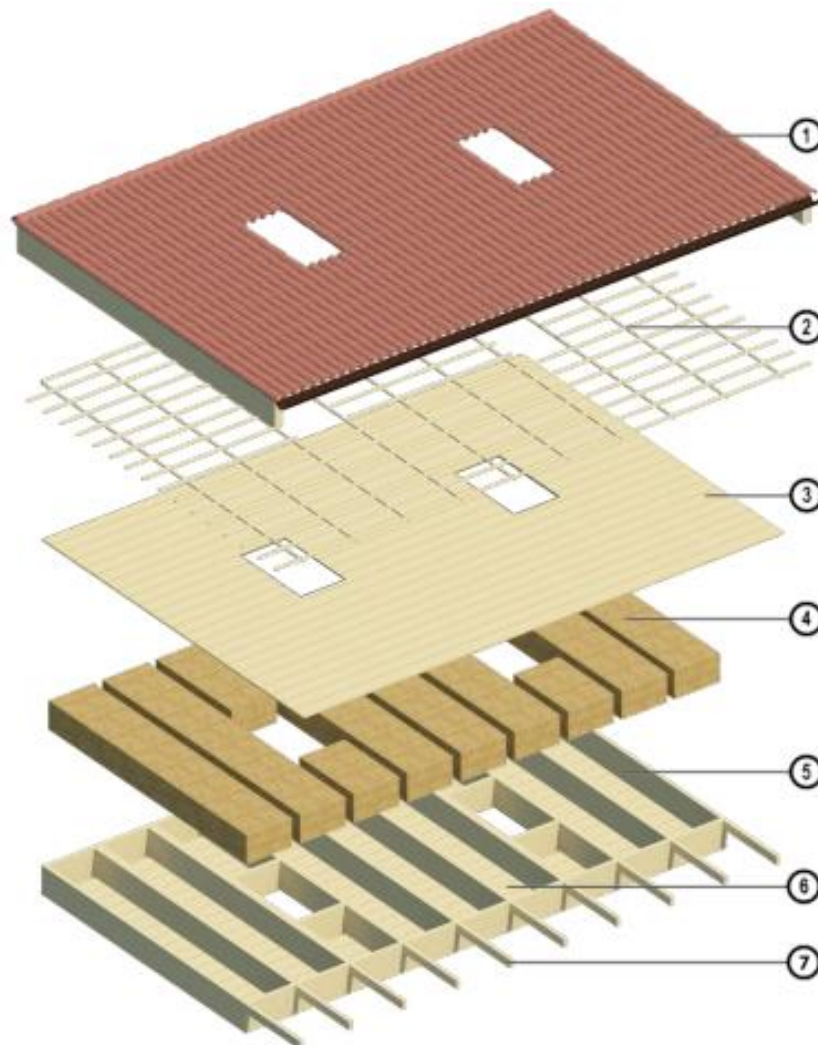


Figura 5.2: Stratigrafia Pablok Roof

- 1) Finitura superiore realizzata in Tegole.
- 2) Listello di micro-ventilazione, sp. 2 x 8 cm + listello reggi tegola, sp. 3 x 4 cm.
- 3) Perlinato superiore maschiato in abete, sp. 2 cm + telo impermeabile Rothoblaas Trampir 205 nastrato, sp 0,6 mm.
- 4) Coibentazione eseguita con uno strato coibente in paglia compressa pretrattata dello spessore di 36 cm + membrana freno a vapore con resistenza termica e meccanica elevate.
- 5) Telaio strutturale in legno di abete costituito da travetti verticali e orizzontali, sp 8 x 36 cm.
- 6) Perlinato a vista effetto perlina, sp. 2 cm
- 7) Passafuori in Abete, sp 8 x 12 cm.

5.2.1 Il sistema Platform Frame

Può essere considerato il sistema più utilizzato quando si parla di strutture a telaio e consiste nel posizionamento di un isolamento termico e acustico all'interno di una struttura realizzata in legno. Questo telaio riempito di materiale isolante viene infine rivestito internamente ed esternamente da strati di finiture che, oltre a resistere agli agenti atmosferici, devono proteggere il materiale all'interno. La scelta di utilizzare questa tecnologia costruttiva è stata fatta grazie alle elevate prestazioni in campo strutturale ed energetico che essa può offrire rispetto alle altre. Essa ha infatti, grazie alla struttura portante dei telai, che riescono a scaricare in modo uniforme le sollecitazioni su tutta la struttura, ha un'ottima resistenza sismica. Il peso ridotto dello scheletro in legno riempito in paglia permette inoltre di utilizzare fondazioni di dimensioni limitate. Grazie alla realizzazione con materiali idonei, anche la resistenza al fuoco è molto elevata; la presenza di pannelli in fibrogesso utilizzati come rivestimento consentono alla paglia un'ulteriore protezione e permettono di resistere più di 120 minuti. Il materiale biologico interno garantisce una resistenza acustica e termica molto elevata che, in un sistema come questo, può anche essere integrata con l'applicazione di un cappotto esterno. Infine, non da sottovalutare, il Platform Frame consente una messa in opera con tempi inferiori a quelli a cui siamo abituati con i materiali tradizionali. La maggior peculiarità con cui questo sistema si differenzia da molti altri è l'autonomia di ogni piano rispetto ai precedenti e successivi: ogni solaio viene infatti utilizzato come basamento per i piani superiori e svincola il telaio delle partizioni del piano inferiore con quello che verrà posato successivamente. Seppur consolidato, il sistema Platform Frame presenta delle criticità che devono essere risolte in fase di progettazione. Le connessioni, infatti, restano il punto critico del sistema, in quanto realizzare collegamenti rigidi come le cerniere in questo caso non risulta semplice. Al loro posto vengono generalmente impiegati tasselli e barre in acciaio. Per quanto riguarda il collegamento tra fondazioni e partizioni verticali, la tecnica più utilizzata è quella delle piastre in acciaio annegate in parte nelle fondazioni e vincolate al telaio. Per ovviare al problema di infiltrazione tra un pannello e l'altro, vengono generalmente applicati nastri adesivi di tenuta all'aria tra i due montanti di testa.

5.2.2 Punti di forza e di debolezza

A seguito di un'analisi del pannello e a seguito delle informazioni fornite dall'Ingegnere Giampaolo Pilloni si è arrivati a definire i seguenti punti di forza e di debolezza del pannello attualmente utilizzato.

Punti di forza

- 1) **Tempi di montaggio ridotti:** grazie alla possibilità di modellare e realizzare elementi di notevoli dimensioni (che possono arrivare a coprire aree superiori ai 20 mq) la costruzione dell'involucro con il sistema Pablok risulta estremamente rapida e permette inoltre di lavorare anche in condizioni meteorologiche non ottimali. Questo è strettamente legato alla riduzione degli oneri finanziari legati ai capitali e/o mutui impegnati per realizzare l'opera;

- 2) Contenuto di sottoprodotto piuttosto elevato: I pannelli prefabbricati sono realizzati per il 47% di paglia compressa, un materiale biologico di scarto agricolo, e acquistabile a prezzi notevolmente inferiori rispetto a quelli di altri materiali con prestazioni simili;
- 3) Versatilità ed adattabilità: Con il sistema Pablok è possibile realizzare qualsiasi tipologia edilizia e con svariate forme. Questo è possibile grazie al passo ridotto dei montanti all'interno dei pannelli, 120 cm, che corrisponde alla larghezza delle lastre in gessofibra che confinano internamente il pannello.
- 4) Integrabilità con strutture tradizionali: le partizioni verticali di questo sistema possono essere impiegate anche nel caso di sostituzione dell'involucro edilizio tradizionale, mantenendo i telai in calcestruzzo armato e/o acciaio esistenti. Questo comporta un'assenza di portanza strutturale da parte dei pannelli che svolgeranno principalmente un ruolo di isolamento termico e acustico
- 5) Costi ridotti: rispetto ai prodotti esistenti con proprietà simili in termini di resistenza termica e acustica e contenuto di riciclato, questa tecnologia garantisce dei costi molto competitivi.
- 6) Rapida e puntuale manutenibilità: in caso di particolari criticità legate a rotture, infiltrazioni o problemi nella stratigrafia, grazie all'involucro realizzato totalmente a secco e non rivestito esternamente da intonaco, la manutenzione sarebbe semplificata dalla possibilità di smontaggio degli elementi presenti e dal loro successivo rimontaggio a seguito della sistemazione della problematica.

Punti di debolezza

- 1) Trasporto e Stoccaggio: Necessità di tenere coperti i manufatti durante il trasporto dalla fabbrica al cantiere e in fase di stoccaggio, in modo da evitare problematiche prima della posa in opera;
- 2) Protezione dello strato di gesso fibra situato nella parte interna del pannello fino al superamento della fase "fuori acqua";
- 3) Infiltrazioni: rischio di infiltrazioni pesanti nelle fasi di cantiere a causa di condizioni meteorologiche sfavorevoli che porterebbero alla presenza di umidità all'interno dello strato isolante e comporterebbero interventi di drenaggio e asciugatura per evitare la formazione di muffe che comprometterebbero le prestazioni dell'involucro.
- 4) Modularità e industrializzazione: per facilitare la fase di produzione e posa in opera di moduli standard applicabili ad ogni tipologia di edificio tradizionale.

- 5) Durabilità: a causa delle principali problematiche legate alla durabilità della paglia, risulta necessario svolgere test specifici per valutare la durabilità del pannello in condizioni critiche e non, analizzando le possibili cause di infiltrazioni di umidità nel pacchetto tecnologico.

Dopo aver appreso, anche attraverso un'analisi accurata della letteratura, che il problema della durabilità dei materiali biologici, e in particolare della paglia, risulta essere l'ostacolo principale da superare per convincere sull'effettiva bontà di questi pacchetti tecnologici, si è deciso di approfondire questo argomento studiando il sistema Pablok proprio sotto l'aspetto della trasmissione e formazione di umidità al suo interno. Nel prossimo capitolo verrà descritto il caso studio su cui sono state effettuate le analisi.

5.3 Il caso studio

Al fine analizzare nel dettaglio le problematiche legate alla trasmissione di calore e umidità all'interno delle pareti e alla formazione di muffe, che possono portare al successivo degrado del materiale isolante, si è scelto di individuare un caso di studio reale, ad oggi in fase di costruzione nel comune di Sarzana (SP). L'opportunità gentilmente concessa dall'Ing. Pilloni consente di non limitarsi allo studio della singola sezione corrente, ma di analizzare i punti più critici di connessione tra gli elementi costruttivi.

La fase di realizzazione dell'edificio oggetto di studio è ancora in corso, e ciò permette di analizzare gli elementi costruttivi nella fase di prefabbricazione in azienda e di successiva posa in opera in cantiere. Il progetto di Sarzana, che prevede la demolizione degli edifici esistenti e la successiva realizzazione di una scuola su due piani fuori terra, ha deciso di affidarsi ad una scelta sostenibile ed innovativa, scegliendo di utilizzare il sistema Pablok per la realizzazione dell'involucro. Per comprendere l'entità dell'intervento si riporta di seguito il processo di cantierizzazione in atto. La prima fase, già completata, si è svolta con lo strip-out e la demolizione dei corpi di fabbrica esistenti e la costruzione al rustico dell'unico piano interrato realizzato in calcestruzzo armato, all'interno del quale verranno ubicati i magazzini, i locali tecnici, la vasca per la riserva idrica antincendio e attiguo locale con la stazione di pompaggio e una grande vasca per il recupero delle acque piovane. La fase in corso consiste nella costruzione delle fondazioni in c.a. degli edifici e nella realizzazione dei fabbricati fuori terra realizzati con l'involucro prefabbricato Pablok. L'area di intervento, in cui verranno edificati i 4 corpi di fabbrica identificabili come "Nuovo Plesso Poggi Carducci", è in una zona piuttosto centrale di Sarzana, a circa seicento metri dalla sede del Comune e si inserisce in un tessuto prevalentemente residenziale. Il progetto prevede un fabbricato che si estende per una totalità di circa 8400 mq e che comprende una scuola primaria e una secondaria di primo grado, il piano terra ne occuperà 4200, il piano primo 3580 e l'interrato i rimanenti 620. [54]

Si riportano di seguito le piante del plesso prima e dopo i lavori:



Figura 5.3: Edifici prima delle demolizioni

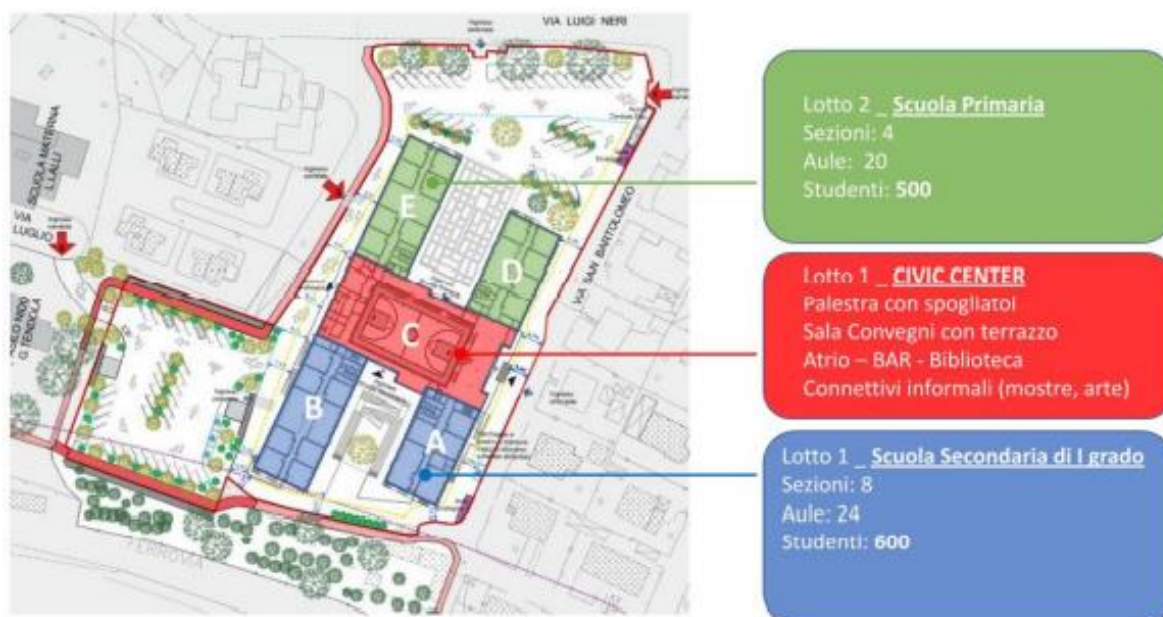


Figura 5.4: Nuovo progetto Scuola di Sarzana (SP)

Il nuovo fabbricato è caratterizzato da una forma ad H che, grazie alla sua particolare configurazione, permette la formazione di due piazze di 800 mq tra le ali, che verranno destinate alle due scuole che occuperanno l'edificio.



Figura 5.5: Render Piazze

La zona centrale verrà destinata a un “Civi Center” che ospiterà un’aula magna, una palestra, una biblioteca e una mensa con bar. Questo luogo viene considerato il cuore dell’edificio scolastico e ospiterà funzioni in cui si svolgeranno attività strettamente legate alla cultura e all’insegnamento. Il resto dell’edificio, suddiviso nelle quattro ali longitudinali, verrà destinato in parte alla scuola secondaria di primo grado e in parte alla scuola primaria.

Al piano terra sarà presente in corrispondenza della struttura centrale un ampio atrio illuminato dalla luce naturale proveniente dalle grandi vetrate esposte a est e ospiterà i connettivi orizzontali e verticali per accedere alle ali e ai piani superiori. Data la vicinanza con la linea ferroviaria si è deciso di destinare l’area del lotto più a ridosso ad essa a una Foresta Commestibile, ovvero un sistema di produzione alimentare e agroforestale sostenibile a bassa manutenzione basato su ecosistemi boschivi, che incorpora alberi da frutto e dado, arbusti, erbe, viti e verdure perenni e che hanno rendimenti direttamente utili per l’uomo.

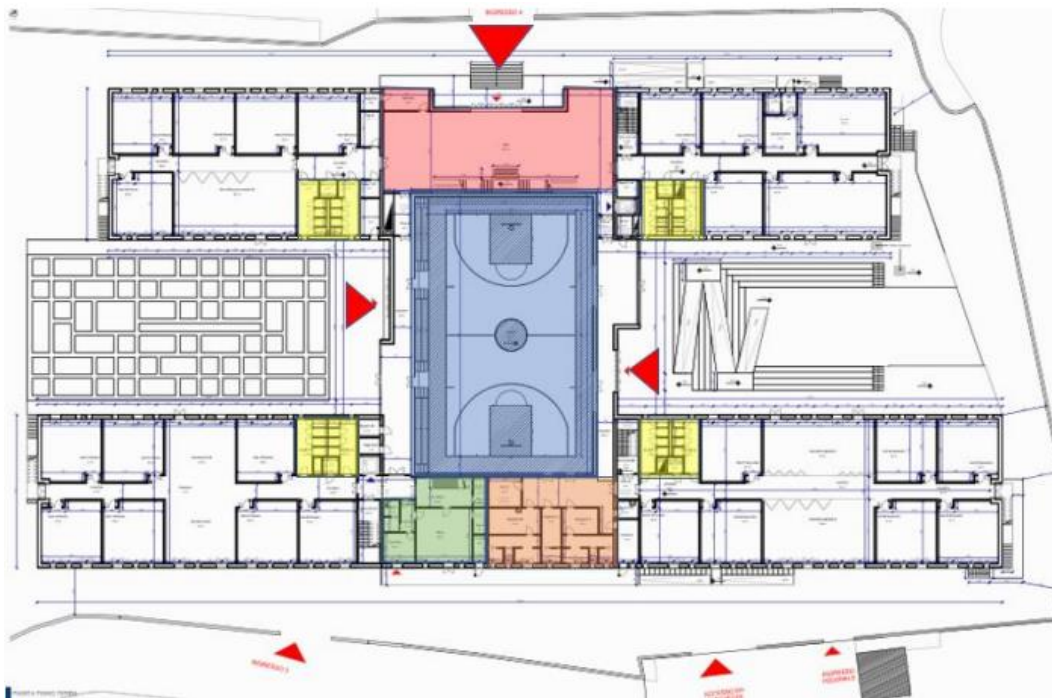


Figura 5.6: Schema funzionale Piano Terra

Le strutture presentano una fondazione in calcestruzzo armato, pilastri e travi in legno lamellare e pannelli prefabbricati Pablok per le partizioni esterne, per i solai interpiano e per la copertura. Il legno verrà quindi impiegato per realizzare tutta la parte portante strutturale fuori terra della costruzione e per i telai leggeri del sistema preassemblato e realizzato con una coibentazione interna derivante dallo scarto della produzione agricola.

La parte fuori terra degli edifici sarà quindi realizzata con:

- Travi e pilastri realizzati in legno lamellare;
- Travi e pilastri realizzati in acciaio nell'atrio a tutt'altezza come elementi portanti a sostegno delle passerelle aeree e per realizzare le scale di sicurezza;
- Chiusure verticali a telaio prefabbricate e precoibentate realizzate con sistema Pablok, che prevede una struttura di montanti e traversi in legno lamellare a costituire un telaio di 36 cm con interposte balle di paglia precomprese al suo interno, chiuso esternamente da un tavolato posizionato a 45° e di spessore 2,5 cm e internamente da un pannello ad alta resistenza al fuoco.
- Solai a cassoni prefabbricati e precoibentati con balle di paglia precompressa di larghezza 250cm. Nel caso di solai interpiano essi presentano travetti in legno lamellare di sezione 12x40 cm mentre per la copertura saranno di 14x36 cm. Lo strato centrale in legno e paglia è completato inferiormente da un pannello OSB/3 di 1,8 cm e superiormente da un tavolato di spessore 2,5 cm posizionato a 45°.
- Muri portanti interni realizzati con una struttura Xlam a 3 strati 40/40/40 di spessore 12 cm e placcati con pannelli in gesso fibra tipo Firepanel Fermacell A1 sp.12,5 mm per garantire una resistenza R60 alla struttura.

Vista la necessità di mantenere la scuola agibile durante il periodo di cantierizzazione, le prime strutture ad essere realizzate e che verranno analizzate sono il corpo A, B e C, che, una volta terminate, consentiranno il normale svolgimento delle attività mentre verrà svolta l'edificazione degli altri due corpi.

Edificio A

Presenta una pianta rettangolare con lati di 32 e 18 metri e si sviluppa su tre piani, un piano interrato e due piani fuori terra che portano la struttura a un'altezza massima di 7,30 metri. Il piano interrato presenta una muratura perimetrale in c.a. di 30 cm con due file di pilastri su cui poggiano le travi in c.a. posizionate sotto le pareti portanti in xlam interne. Le fondazioni sono costituite da una platea in c.a. e di sp 30 cm. L'impalcato di che separa l'interrato e il piano terra, poiché già realizzato, è composto da lastre predalles con cappa in cemento armato con funzione di distribuire il carico sismico alle pareti laterali. La copertura strutturale è piana con inclinazione delle falde ricreata superiormente da lastre grecate.

Edificio B

Presenta una pianta rettangolare con lati di 45 e 18 metri, si sviluppa su due piani fuori terra che portano la struttura a un'altezza massima di 7,30 m. Le fondazioni sono a trave rovescia in c.a. con spessore 35 cm e vespaio su igloo. La copertura strutturale è piana con inclinazione delle falde ricreata superiormente.

L'edificio C

Presenta una pianta rettangolare con lati di 55 e 30 metri e ingloba la zona centrale "Palestra" dalle dimensioni di 33 x 21 metri con un'altezza di 11 m circonscritta da zone connettive a 2 piani con altezza massima di 7,30 m. Le fondazioni sono costituite da una platea in c.a. e di sp 30 cm. La struttura di copertura della zona connettiva è piana con inclinazione delle falde ricreata superiormente, mentre l'ala di copertura della palestra è a doppia falda definita da una trave con doppia rastremazione.



Figura 5.7: : Edifici A / B / C

5. PABLOK, un sistema innovativo

I corpi analizzati precedentemente presenteranno una lamiera grecata al di sopra della copertura. Essa sarà coibentata con una schiuma poliuretanic a cellule chiuse, applicata all'intradosso della lastra, con uno spessore costante di 10 mm che seguirà la superficie geometrica della greca da posare.

All'interno dei blocchi saranno presenti delle partizioni realizzate con sistemi a secco mediante lastre in gesso fibra montate su struttura metallica costituita da profili di acciaio zincato; all'interno delle intercapedini saranno posati pannelli per l'isolamento acustico in lana di roccia.

Esternamente invece gli edifici verranno rivestiti del piano terra fino al filo superiore della copertura con pannelli in lana di legno di abete rosso mineralizzata e legata con cemento portland con successivo intonaco e tinteggiatura per esterni.

Per comprendere al meglio l'abbattimento previsto dal punto di vista del fabbisogno energetico globale è stato fatto un confronto tra gli edifici presenti sul lotto prima della demolizione e quelli realizzati con la tecnologia Pablok. Inizialmente il plesso scolastico presentava una richiesta di 217 KWh/m², una volta terminati i lavori si stima che il consumo totale di energia primaria si aggiri attorno ai 37,9 KWh/m² anno. È stato possibile ottenere questi risultati grazie all'utilizzo di un involucro con 36 cm di isolante, che, oltre alle prestazioni in opera, garantisce una grande riduzione di energie ed emissioni durante la propria fase produttiva.

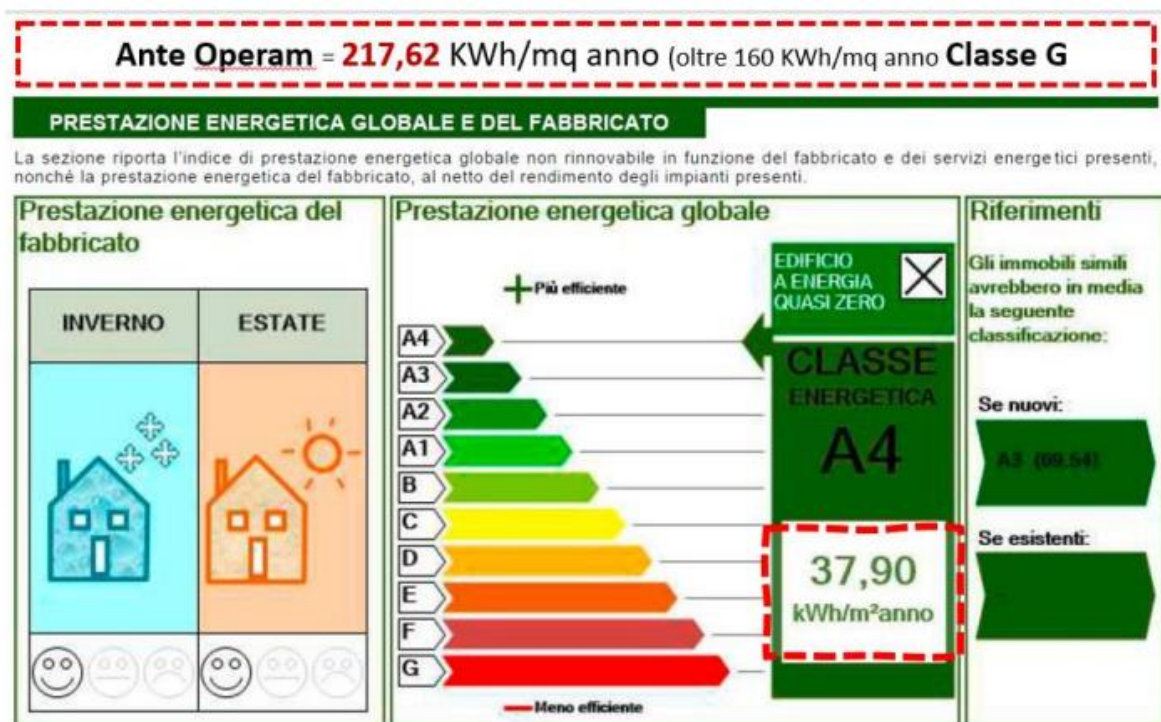


Figura 5.8: Prestazione energetica con tecnologia Pablok

6 Metodologia di analisi

Come la maggior parte dei sistemi prefabbricati presenti sul mercato, PABLOK è il risultato di una continua ricerca di sviluppo nell'applicazione dei materiali biologici nel mondo delle costruzioni. Seppur ormai consolidato e certificato nella maggior parte degli aspetti, per questo sistema, ad oggi, non sono stati effettuati particolari studi che riguardino la durabilità del pacchetto. Per questo tipo di indagini vengono spesso eseguiti test di invecchiamento accelerato e studi di termociclaggio. I primi consistono in una imitazione reale di condizioni ambientali specifiche che riescono a riprodurre in un breve periodo lo stato finale di invecchiamento di un materiale, così da poterne analizzare il degrado e i meccanismi da esso generati. Lo studio del termociclaggio, definito anche fatica termica, consiste invece in un test di durabilità che analizza il degrado del materiale attraverso cicli di riscaldamento-raffreddamento all'interno di una camera di controllo, in modo da analizzare i comportamenti del materiale durante il suo reale ciclo di vita, evidenziando le problematiche superficiali, come cambio di colore, crepe e fessurazioni, e la variazione delle proprietà meccaniche. Oltre a questi test di durabilità, è indispensabile svolgere analisi numeriche specifiche, basate su precedenti studi di laboratorio, che analizzino la formazione di condensa fra i diversi materiali e la successiva crescita di muffa e degrado. Per comprendere il metodo utilizzato in questo caso di studio è necessario sottolineare che le due cause principali che comportano la crescita di muffa sono la temperatura e l'umidità relativa sulle superfici dei materiali, e non quelle ambientali. Questo è importante in quanto all'interno di un edificio, le condizioni superficiali di un materiale specifico possono variare notevolmente da una zona rispetto a un'altra a causa di crepe, ponti termici e fenomeni di flusso locale. Per un'analisi accurata bisogna quindi fare uno studio del pacchetto stratigrafico analizzando tutti quei punti che potrebbero generare condizioni favorevoli alla formazione di muffa. Per determinare le condizioni ambientali di una superficie è necessario effettuare un calcolo del flusso di umidità fra i materiali porosi e l'aria adiacente ad essi e analizzare il flusso di umidità fra i materiali da costruzione multistrato. Per effettuare questi calcoli sono stati sviluppati diversi modelli matematici per il trasporto di massa e calore. In generale però i modelli igrotermici non sono così semplici da risolvere; questo a causa della non linearità delle isoterme di assorbimento dei materiali biologici, e di quelle del trasferimento simultaneo di massa e calore.

Tra i modelli più completi e diffusi utilizzati in questo campo c'è il "Latenite VTT Mold Model", sviluppato da Viitanen e Ritschkoff attraverso studi di laboratorio effettuati su specie legnose dei paesi nordici.

All'interno di questo modello, per quantificare la crescita della muffa, viene utilizzato l'indice di crescita delle muffe che viene generalmente applicato negli esperimenti per l'ispezione visiva: il Mold Growth Index (M). Esso rappresenta un parametro di riferimento che analizza le condizioni in cui si trova un materiale e definisce se possono essere considerate favorevoli o non favorevoli alla formazione di muffa. Ciò viene effettuato attraverso una tabella di indici che variano da zero a sei, dove il valore più basso (0) rappresenta la condizione di servizio ottimale, in cui la crescita di muffa non è favorita dalle condizioni ambientali, e il valore più alto (6) indica un altissimo rischio di crescita di muffa nel materiale e una proliferazione totale sulla sua superficie esposta. [46]

Mold Growth Index for the Experiments and Modeling		
Index	Growth Rate	Description
0	No growth	Spores not activated
1	Small amounts of mold on surface (microscope)	Initial stages of growth
2	<10% coverage of mold on surface (microscope)	—
3	10%–30% coverage of mold on surface (visual)	New spores produced
4	30%–70% coverage of mold on surface (visual)	Moderate growth
5	>70% coverage of mold on surface (visual)	Plenty of growth
6	Very heavy and tight growth	Coverage around 100%

Tabella 6.1: Identificazione dell'indice di crescita di muffa

di crescita della muffa e le differenti condizioni ambientali in cui il materiale può trovarsi. Esso comprende quindi gli effetti dati dalla temperatura, dall'umidità relativa, dal tempo di esposizione e dai periodi asciutti. Quando si studia la crescita di muffa sul materiale è indispensabile conoscere la soglia minima in cui ne è possibile la crescita. Grazie allo studio effettuato da Viitanen et. al. si è evidenziato come, attraverso un diagramma matematico con una forma a parabola, è possibile descrivere le condizioni di temperatura e umidità relativa favorevoli alla crescita di muffa. La curva limite dell'umidità relativa è stata descritta utilizzando una funzione polinomiale (1) che genera il valore più grande possibile del Mold Growth Index (M).

$$RH_{crit} = -0,00267 T^3 + 0,160 T^2 - 3,13 T + 100 \quad \text{con } T \leq 20$$

$$RH_{crit} = 80\% \quad \text{con } T > 20 \quad (1)$$

$$M_{max} = 1 + (RH_{crit} - RH) / (RH_{crit} - 100) - 2 [(RH_{crit} - RH) / (RH_{crit} - 100)]^2$$

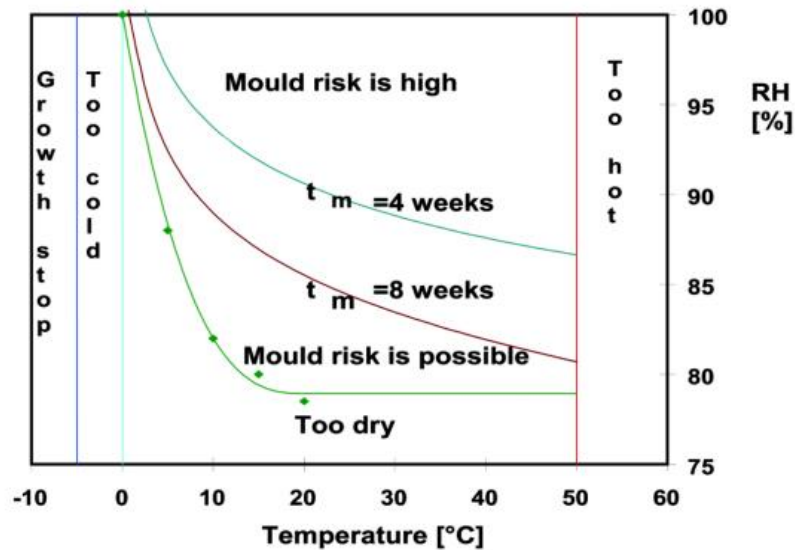


Figura 6.1 Diagramma delle condizioni favorevoli alla crescita di muffa

Attraverso l'utilizzo dei valori di temperatura e UR, il modello completo per l'analisi della crescita di muffe in condizioni favorevoli viene espresso come di seguito:

$$\frac{dM}{dt} = (k_1 * k_2) / [7 \exp(-0,68 \ln T - 13,9 \ln R + 0,14 W - 0,33 SQ + 66,02)]$$

Con W a indicare la specie legnosa (0 = pino e 1 = abete rosso), SQ la qualità della superficie (0 per il legname essiccato in forno e 1 per il legname essiccato naturalmente), $k_1 = 1$ se $M_{max} < 1$ e $k_1 = 2 / (t_v/t_m - 1)$ se $M_{max} > 1$. k_2 è invece un coefficiente di correzione utilizzato per tener conto all'interno dell'equazione della presenza di un limite superiore per la crescita di muffa. Nei casi in cui M si avvicina ai livelli superiori a 4, la curva di risposta dovrà piegarsi. Il suo valore può essere scritto come:

$$k_2 = \max(1 - \exp 2,3 (M + M_{max}); 0)$$

Il modello sviluppato nel 2007 da Viitanen et. al., ottenuto attraverso l'utilizzo di un vasto insieme di dati ricavati da esperimenti costanti e dinamici a breve termine con materiale legnoso, considera parametri con valori numerici adatti per le specie legnose analizzate, ovvero l'abete rosso e l'alburno di pino. Per questo motivo negli anni successivi tale modello è stato implementato per poter includere tutti i materiali, classificandoli in categorie in base alla loro sensibilità alla crescita di muffa.

Per svolgere l'analisi igrotermica della stratigrafia e dei nodi più critici della struttura si è scelto di utilizzare il programma DELPHIN 6.1.5, un programma di simulazione sviluppato dal Institut für Baukli - matik della TUDresden per il trasporto accoppiato di calore, umidità e materia all'interno di materiali da costruzione porosi, in grado di calcolare i rischi di crescita di muffa secondo il "Latenite VTT Mold Model". Grazie alla possibilità di disegno

in una dimensione (per stratigrafie, coperture e solai), due dimensioni (nodi 2D), e tre dimensioni (nodi 3D) DELPHIN consente di svolgere anche analisi per:

- Il calcolo dei ponti termici, in cui è possibile eseguire una valutazione delle zone più problematiche da punto di vista igrotermico, identificando la formazione di condensa superficiale e interstiziale;
- Progettare e valutare pacchetti isolanti;
- Valutare l'efficienza di sistemi di facciate ventilate e tetti ventilati;
- Calcolare l'effettiva domanda annuale necessaria per il riscaldamento di una struttura;
- Identificare eventuali problemi di asciugatura in seguito a infiltrazioni di umidità;
- Calcolare il rischio di formazione di muffe nella stratigrafia.
- Analizzare il processo di trasporto del sale e definire il degrado e i danni dei materiali da costruzione causati da esso.
- Descrivere il trasporto di inquinanti/COV all'interno dei materiali

Grazie alle molteplici funzioni offerte, DELPHIN risulta uno strumento ottimo per lo sviluppo e l'ottimizzazione di materiali porosi e di origine naturale come la paglia. Attraverso l'utilizzo di un database di dati climatici è possibile, inoltre, confrontare la risposta di un materiale o di un pacchetto stratigrafico come PABLOK in diverse condizioni esterne, valutandone l'efficienza anche in differenti località rispetto a quelle in cui viene attualmente utilizzato.

Grazie alla possibilità di inserimento di condizioni al contorno specifiche, sia per la temperatura che per l'umidità relativa interna ed esterna, attraverso la modellazione delle stratigrafie è stato possibile svolgere un'analisi specifica sull'isolante in paglia presente nel pacchetto, valutando le percentuali di umidità a cui veniva sottoposto durante differenti cicli annuali.

Nel seguente capitolo verrà descritta nel dettaglio l'analisi svolta per questo caso specifico, illustrando i passaggi effettuati per ottenere i risultati che saranno mostrati più avanti.

Dopo l'inizializzazione, per eseguire la simulazione il programma richiede l'inserimento di diversi input. Prima vanno scelte (se presenti nel software) o inserite le condizioni al contorno considerate per il modello di calcolo agli elementi finiti, questo per ottenere dei risultati il più possibile realistici.

Si riportano di seguito quelle utilizzate per il caso specifico di Sarzana:

- Comune: Sarzana – Liuni
- Zona climatica: D
- Esposizione: Nord (la più sfavorevole)
- Inclinazione rispetto all'orizzontale: 90° per la parete e 10° per la copertura
- T_{ext} (°C): variabile dal file climatico (dataset da file .epw Sarzana – Liuni)

- T_{int} (°C): variabile da normativa DIN EN 15026/WTA (climatizzazione nei mesi invernali ed estivi con T di set point di 20°C e 25°C)
- RH_{ext} (%): variabile dal file climatico (dataset da file .epw Sarzana – Liuni)
- RH_{int} (%): da normativa DIN EN 15026/WTA (climatizzazione nei mesi invernali ed estivi con RH di set point di 35% e 65% per produzione di vapore maggiorata del 5%)
- I_{solar} : (W/m²): variabile da file climatico (dataset da file .epw Sarzana - Liuni)

Per garantire una corretta interpretazione dei risultati ottenuti attraverso queste analisi è indispensabile specificare che durante le simulazioni non è stata considerata l'influenza della pioggia battente sui pacchetti stratigrafici analizzati. Solo i dati di temperatura e umidità relativa hanno infatti influito sul comportamento del materiale. L'assenza di dati specifici nei database e l'impossibilità di reperirli per un ciclo di tempo così lungo ha portato alla scelta di analizzare l'influenza dei soli parametri elencati precedentemente, sulla stratigrafia. Questa scelta ha inoltre permesso di analizzare l'influenza della membrana impermeabilizzante esterna sul trasporto di vapore e la formazione di condensa fra i differenti strati.

Una volta inseriti i dati climatici e le condizioni al contorno è necessario modellare la stratigrafia da analizzare nel programma. Viene inizialmente disegnata attraverso l'interfaccia grafica di DELPHIN e successivamente vengono assegnati i materiali ad ogni strato. Quest'ultimo passaggio viene generalmente eseguito selezionando i materiali dal database del programma; in questo caso specifico però non tutti i materiali erano già presenti all'interno, come il pacchetto isolante in paglia, ed è stato necessario inserirli manualmente definendone le caratteristiche igrotermiche necessarie ad ottenere le funzioni specifiche di thermal transport, moisture storage, vapour transport e liquid transport. In questo modo, attraverso il software, sarà possibile valutare dinamicamente il comportamento del materiale al variare delle condizioni al contorno. Il pacchetto PABLOK utilizzato per la scuola di Sarzana presenta alcune differenze da quello "standard" analizzato precedentemente, questo per migliorare le prestazioni termiche della struttura. La stratigrafia della chiusura verticale è la seguente:

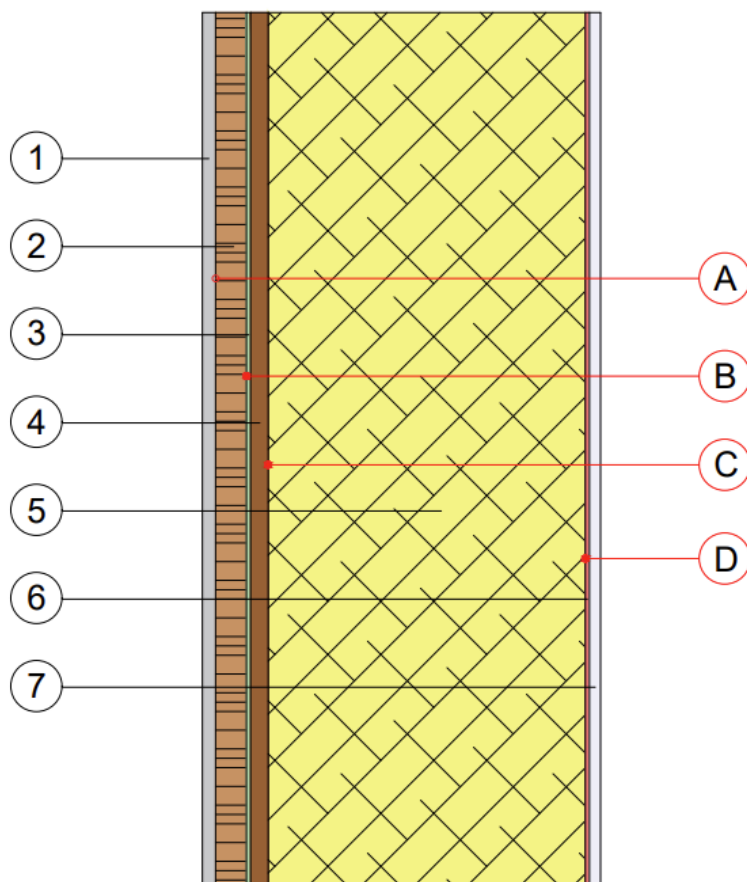


Figura 6.2 Stratigrafia CV.01

- 1) Intonaco di calce e sabbia (15 mm)
- 2) Lana di legno (35 mm)
- 3) Telo traspirante Traspir 150 Rothoblaas (0,7 mm)
- 4) Tavolato ligneo in abete giuntato maschiato inclinato a 45° (20 mm)
- 5) Materiale isolante naturale paglia compressa pretrattata (360 mm)
- 6) Freno al vapore Vapor 150 (0,5 mm)
- 7) Lastra in gessofibra tipo Fermacell o similare (12,5 mm)

Una volta inserita la stratigrafia bisogna definire gli Output che si desiderano ottenere. Volendo analizzare anche alcune interfacce specifiche tra i materiali presenti nel pacchetto, è necessario attribuire anche a questi punti la corrispondente quantità da misurare. DELPHIN, oltre a disporre di moltissime quantità misurabili sull'intero pacchetto, consente infatti di applicare alcune di esse a dei punti specifici tra i materiali, così da comprendere il comportamento di un singolo elemento o in una singola interfaccia all'interno della stratigrafia. Una volta scelti gli output e applicati alle zone interessate è necessario definire l'intervallo di misurazione per ciascuna quantità: generalmente i valori misurati su intere superfici e pacchetti stratigrafici hanno un intervallo di 1,5 giorni tra una misurazione e l'altra.

Per analizzare il comportamento dell'intero pacchetto al variare delle condizioni al contorno, sono stati scelti i seguenti file di output:

- Profilo della temperatura nella stratigrafia;
- Profilo dell'umidità relativa nella stratigrafia;
- Profilo della condensa nella stratigrafia;
- Profilo della pressione di vapore nella stratigrafia;

Per poter applicare il modello di crescita di muffa sono stati invece calcolati:

- Temperatura nei punti critici;
- Umidità relativa nei punti critici.

Per eseguire una simulazione igrotermica realistica è necessario utilizzare una durata minima di almeno cinque anni, così da poter instaurare una ciclicità nei valori analizzati ed evidenziare quelle situazioni che potrebbero sviluppare un problema serio a causa della crescita di muffa. Per quanto tale periodo sia sufficiente, considerata la vita utile di un edificio si è pensato di svolgere l'analisi su un periodo più lungo, 10 anni, in modo da comprendere quello che potrebbero essere lo stato del materiale anche dopo un periodo più lungo. Questo, oltre a evidenziare le possibili problematiche del pacchetto stratigrafico, può risultare utile per programmare gli interventi di manutenzione dell'edificio, per studiare quanto questi siano impattanti dal punto di vista energetico e monetario e sviluppare di conseguenza un Life Cycle Assessment.

Una volta inseriti gli input e definiti gli output desiderati, è stata fatta partire la simulazione, i cui risultati sono consultabili attraverso il post-processore esterno POST PROC 2.

La chiusura verticale è stata quindi il primo dei pacchetti tecnologici analizzati. Seppur l'isolante in paglia risulta essere al centro dello studio, per completezza si è scelto di effettuare l'analisi alle interfacce di tutti e due gli strati isolanti con i materiali adiacenti presenti nella stratigrafia, essendo i punti più critici in cui la probabilità di formazione di muffa risulta più alta.

Considerando quindi lo strato in paglia e quello in lana di legno, partendo dall'esterno (da sinistra nella stratigrafia) i quattro punti sono stati chiamati:

- Paglia - Left interface;
- Paglia - Right interface;
- Lana di Legno - Left interface;
- Lana di Legno - Right interface;

Una volta estrapolati i risultati della chiusura verticale, consultabili nel capitolo successivo, si è passati all'analisi del pacchetto di copertura inclinata. Anche in questo caso il procedimento seguito è stato lo stesso evidenziato precedentemente, analizzando prima gli output relativi alla totalità della stratigrafia (UR, Temperatura, Pressione di vapore, Condensa) e passando successivamente all'analisi dei punti più critici del pacchetto. In

questo caso, essendo presente un solo strato isolante con funzione isolante, le interfacce con i materiali sono state solamente due:

- Paglia - Left interface;
- Paglia - Right interface;

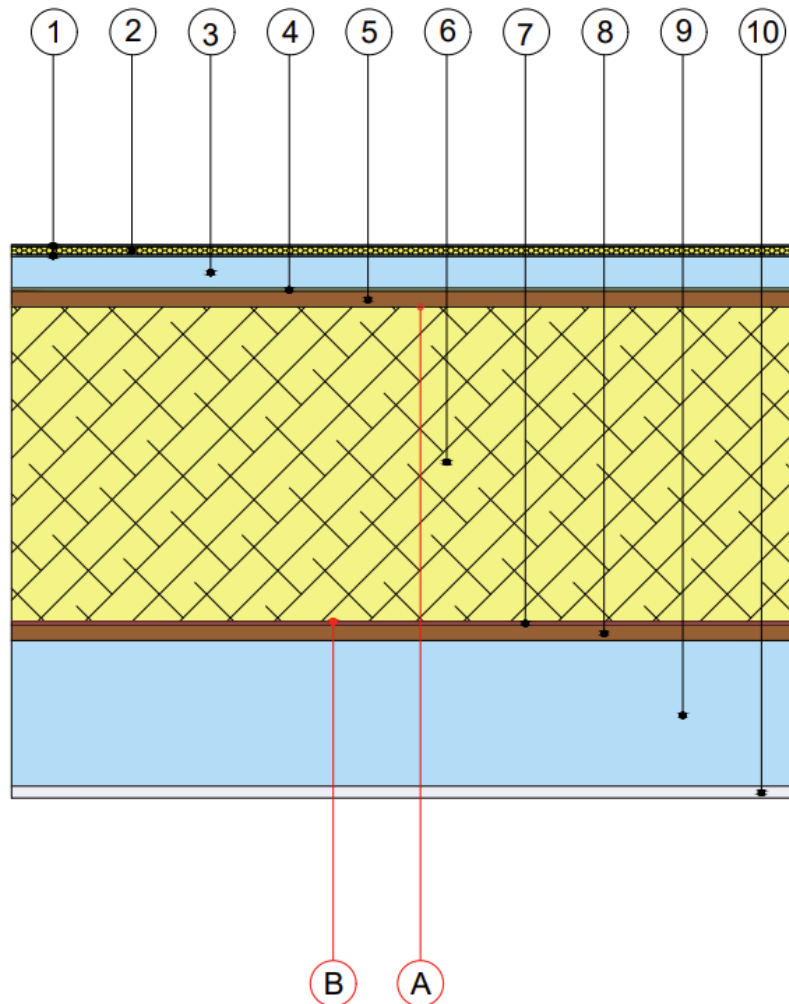


Figura 6.3 Stratigrafia CO.01

- 1) Acciaio (1 mm)
- 2) Poliuretano espanso in fabbrica tra lamiere sigillate (10 mm)
- 3) Intercapedine debolmente ventilata $A_v = 600 \text{ mm}^2/\text{m}$ (40 mm)
- 4) Telo traspirante Traspir 150 Rothoblaas (0,7 mm)
- 5) Tavolato ligneo in abete giuntato maschiato inclinato a 45° (20 mm)
- 6) Materiale isolante naturale in paglia compressa pretrattata (400 mm)
- 7) Freno al vapore Vapor 150 (0,5 mm)
- 8) Tavolato ligneo in abete giuntato maschiato inclinato a 45° (20 mm)
- 9) Intercapedine non ventilata $A_v < 500 \text{ mm}^2/\text{m}$ (185 mm)
- 10) Cartongesso in lastre (15 mm)

Seppur indicativi per il caso studio analizzato, i test effettuati sui due pacchetti stratigrafici limiterebbero la conferma di una buona resistenza a durabilità e formazione di muffe nella sola scuola di Sarzana e in tutti quegli edifici realizzati in condizioni climatiche simili. Per ampliare le indagini e studiare l'effettiva applicabilità di PABLOK in Italia, si è scelto di svolgere le analisi anche in altri due luoghi con climi molto differenti tra loro. In particolare, attraverso il programma di simulazione, si è scelto di ripetere il calcolo nelle seguenti località:

- Palermo (Zona B);
- Dobbiaco (Zona F);

Una volta effettuati i calcoli si è deciso di testare il pacchetto PABLOK effettuando delle variazioni nella composizione della stratigrafia. Questo studio è stato effettuato sia per testare l'effettiva necessità di alcuni elementi, sia per comprendere le possibili reazioni del pacchetto in caso di inserimento di strati che dovrebbero portare alla formazione di condensa interstiziale. Lo step successivo ha portato allo studio delle due seguenti soluzioni tecnologiche, per le quali sono stati ripetuti i calcoli a cui erano state sottoposte nel caso studio di Sarzana:

- Stratigrafia PABLOK senza membrane e freni a vapore: si è scelto di eliminare lo strato di impermeabilizzazione con telo traspirante Traspir 150 Rothoblaas e quello di freno a vapore con Traspir 150 Rothoblaas, in modo da valutare l'impatto che l'assenza delle stesse potesse avere sul pacchetto dal punto di vista di durabilità e formazione di muffa.
- Stratigrafia PABLOK a totale tenuta: per analizzare un caso particolarmente critico per la formazione di condensa tra le superfici, si è scelto di sostituire la membrana di impermeabilizzante traspirante, con fattore di resistenza a diffusione di vapore pari a 40, con una barriera al vapore non traspirante (Riwega DS 188 ALU), con fattore di resistenza a diffusione di vapore pari a 666667.

Ogni combinazione di clima e stratigrafia analizzata verrà mostrata all'interno del capitolo 7 con i rispettivi risultati.

7 Risultati

A seguito delle analisi descritte nel capitolo precedente, si riportano di seguito i principali risultati ottenuti per le prove effettuate. È possibile invece visionare la totalità dei grafici ottenuti all'interno dell'Allegato A.

7.1 Il caso studio

CHIUSURA VERTICALE

Il primo caso analizzato è stato il pacchetto stratigrafico progettato e realizzato per la chiusura verticale della scuola di Sarzana, nelle condizioni climatiche reali in cui esso dovrà operare nella sua vita utile. Come è possibile evidenziare dai grafici, gli studi sono stati effettuati e riportati su un periodo di dieci anni. Per comprendere la risposta dell'intero pacchetto alle condizioni climatiche a cui viene sottoposto, si riportano di seguito i grafici di:

- Temperatura

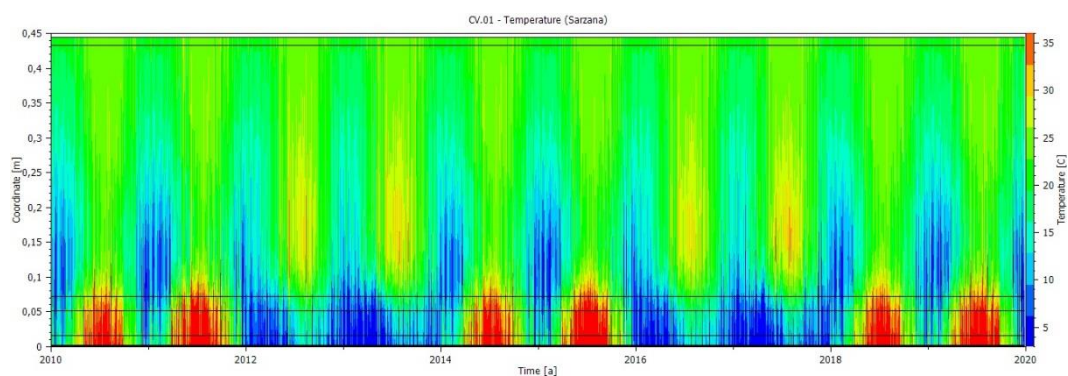


Figura 7.1 Profilo di temperatura CV.01 - (Sarzana)

7. Risultati

- Umidità Relativa

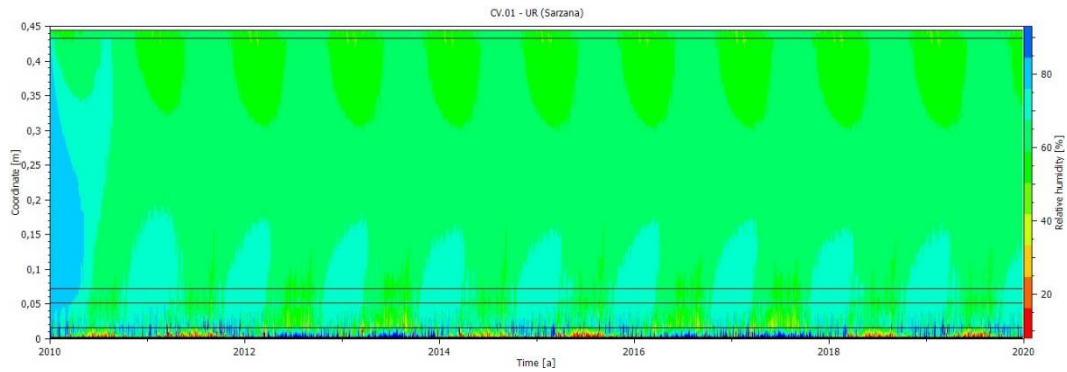


Figura 7.2 Profilo di umidità relativa CV.01 - (Sarzana)

- Pressione di Vapore

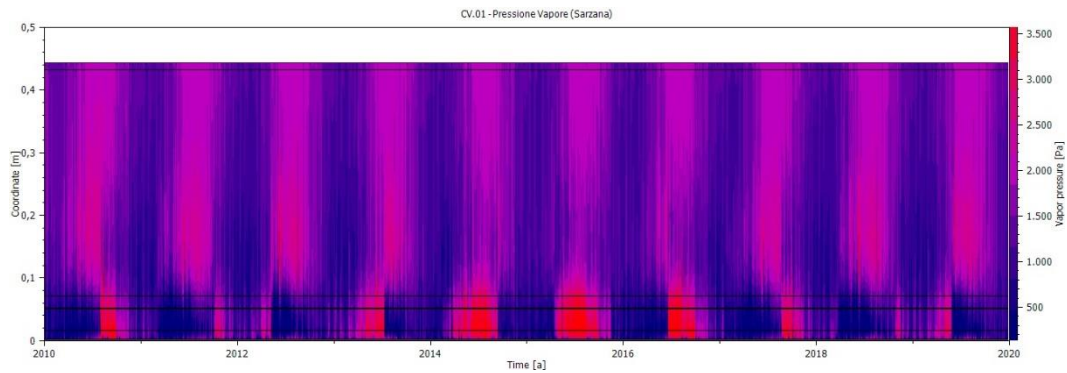


Figura 7.3 Profilo pressione di vapore CV.01 - (Sarzana)

- Profilo di condensa

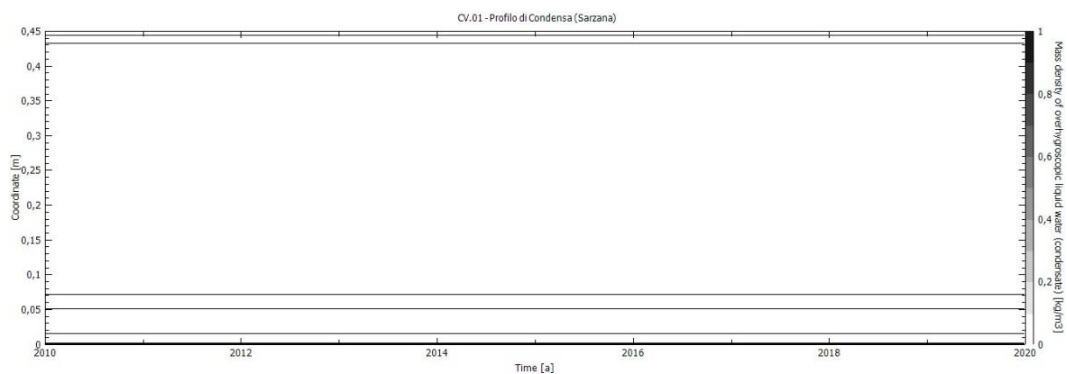


Figura 7.4 Profilo di condensa CV.01 - (Sarzana)

Per evidenziare la formazione di condensa nel pacchetto, ci si è quindi concentrati nell'analisi dei punti più soggetti a questa problematica. Le interfacce dei due isolanti (Paglia e Lana di legno) con gli strati adiacenti sono quindi state singolarmente studiate. Come primo risultato della simulazione, si riporta l'andamento della temperatura e dell'umidità relativa nei dieci anni considerati per i quattro punti scelti. Attraverso i seguenti grafici è possibile osservare la ciclicità di questi valori, che subiscono differenti variazioni in base alla posizione del punto di misurazione. La temperatura e l'umidità relativa subiscono infatti una variazione molto inferiore nelle interfacce più interne, dove i valori sono meno influenzati dalle condizioni esterne e restano più simili a quelle ideali da mantenere all'interno dell'edificio. Questa grande differenza tra i valori ottenuti in un'interfaccia rispetto che a un'altra influenza le possibili differenze nei risultati che si otterranno con l'applicazione del modello VTT.

- Temperatura

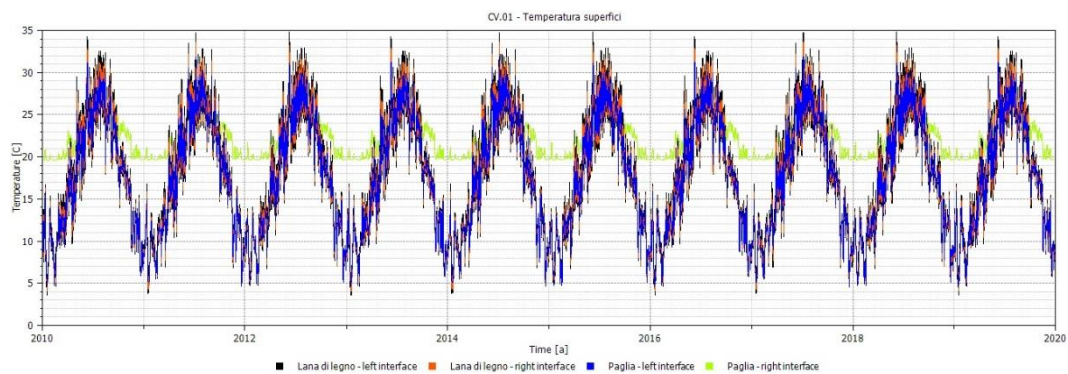


Figura 7.5 Profilo delle temperature superficiali - CV.01 (Sarzana)

- Umidità Relativa

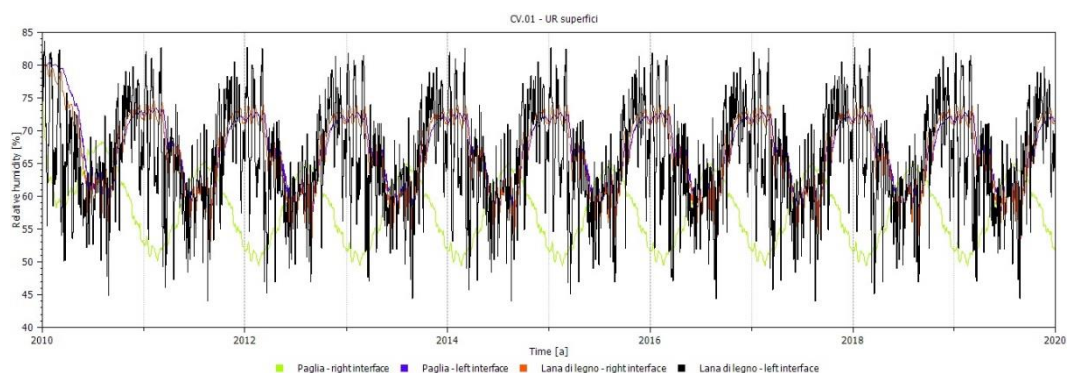


Figura 7.6 Profilo delle umidità relative superficiali - CV.01 (Sarzana)

7. Risultati

Per concludere l'analisi, una volta estratti i dati di temperatura e umidità relativa di ogni punto, sempre attraverso il programma di simulazione si è ricavato il grafico con l'evoluzione del Mold Growth Index lungo la durata del tempo della simulazione. Seppur entrambi i materiali isolanti a base biologica rappresentino un terreno ottimale per la crescita di muffa, per quanto riguarda le prime tre interfacce partendo dall'interno (paglia right interface, paglia left interface, lana di legno right interface) il risultato dell'analisi di crescita di muffa è costantemente nullo. Dunque, in queste tre interfacce non si riscontra la formazione di muffa per l'intera vita utile del pacchetto. Si riporta solo un grafico come esempio a titolo esemplificativo.

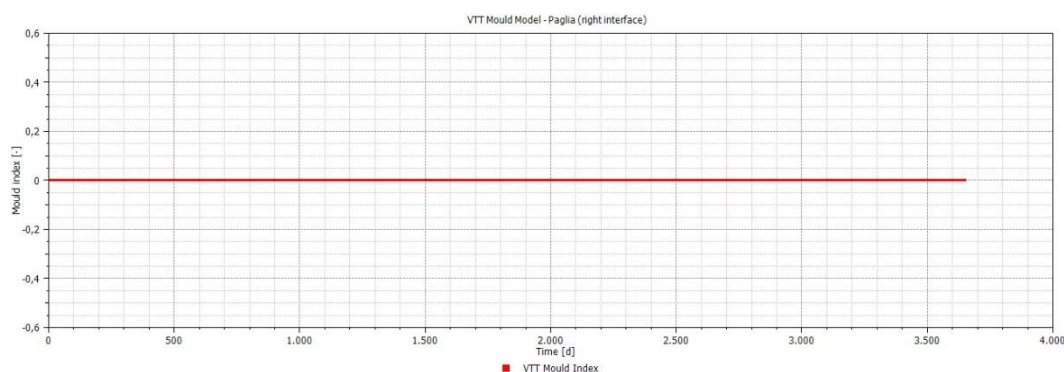


Figura 7.7 VTT Mold Model delle tre interfacce più interne - CV.01 (Sarzana)

Questo risultato evidenzia il mancato superamento del limite critico di umidità relativa che comporterebbe il degrado e la crescita di muffa nei materiali. Seppur molto simile ai grafici osservati fino ad ora, per l'interfaccia più esterna dell'isolante in lana di legno si può evidenziare una lieve differenza. Durante il periodo invernale del primo anno di vita del pacchetto, si riscontra infatti una piccola variazione dell'indice di formazione di muffa. Superati i due mesi iniziali, l'indice sembra stabilizzarsi nel tempo, fino all'inverno successivo, dove si ripresenta una lievissima variazione, ancora inferiore rispetto a quella analizzata precedentemente. Quest'ultimo episodio si ripete poi ciclicamente nel corso di ogni anno, presentando una variazione invernale che si neutralizza nel resto dell'anno. Seppur non pari a zero, questa minima formazione di muffa può considerarsi del tutto trascurabile.

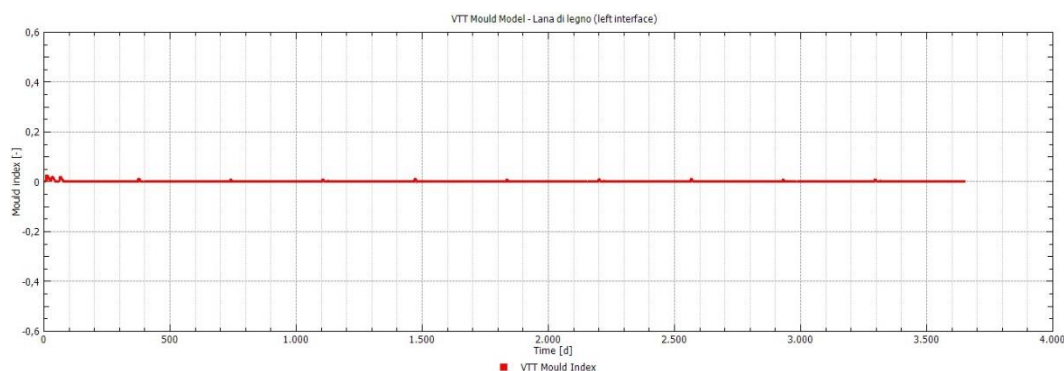


Figura 7.8 VTT Mold Model dell'interfaccia più critica - CV.01 (Sarzana)

Per verificare l'attendibilità dei risultati e la correttezza del grafico del VTT Mold Model della zona più critica (Lana di Legno – Interfaccia Sinistra), si è scelto di confrontare, attraverso un grafico in Excel, i valori di Umidità Relativa effettivamente ottenuta e quelli dell'Umidità Relativa Critica ricavati attraverso la formula (1) presente nel capitolo 6.

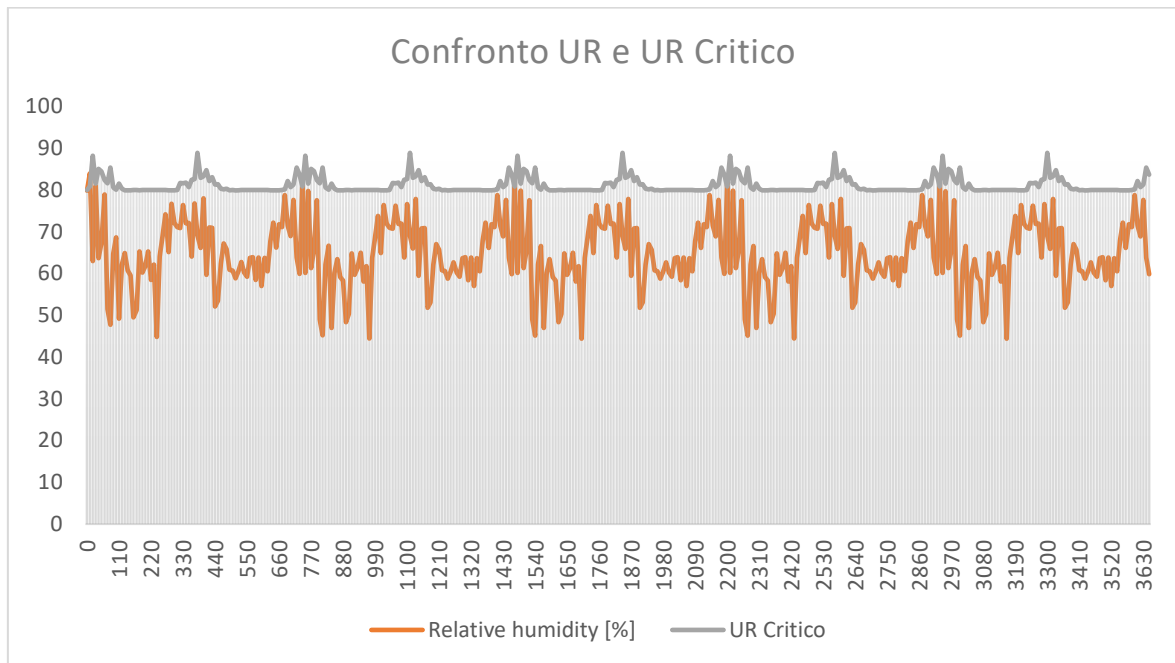


Figura 7.9 Confronto UR effettivo e UR critico CV.01 - (Sarzana)

L'andamento del grafico rispecchia i risultati ottenuti con il VTT Mold Model, evidenziando dei lievi superamenti del UR critico nella fase iniziale e dei picchi invernali che ciclicamente si ripetono negli anni, senza però mai creare veri problemi di formazione di muffa all'interfaccia.

Data l'assenza di problematiche particolarmente rilevanti, si è proseguito con le simulazioni, variando le condizioni climatiche e inserendone due estremamente diverse (Dobbiaco – Zona F; Palermo – Zona B). In entrambe le località, seppur con valori di temperatura e umidità relativa completamente diverse, i risultati sono continuati ad essere del tutto positivi, non presentando alcuna formazione di muffa nelle quattro interfacce considerate. Data l'efficienza del pacchetto PABLOK evidenziata fino a questo momento, si è passati all'analisi delle due varianti alla stratigrafia reale, definite:

- Aperta: senza membrane impermeabilizzanti e freni a vapore;
- Totale tenuta: con uno strato impermeabilizzante non traspirante al posto di quello esistente.

La risposta della stratigrafia “Aperta” è risultata del tutto positiva, confermando l'assenza di formazione di muffa e mostrando grafici molto simili a quelli del pacchetto originale. Questo risultato mostra come il freno a vapore risulti non necessario per proteggere la stratigrafia dal degrado generato dalla formazione di muffa. Tale constatazione non può essere

7. Risultati

confermata per la membrana impermeabilizzante che, seppur non decisiva nella formazione di muffe generate dalla condensa, in caso venisse considerata l'influenza della pioggia battente, giocherebbe un ruolo fondamentale nel mantenimento degli isolanti biologici in condizioni ottimali.

Per quanto riguarda il pacchetto a "Totale tenuta" si può constatare come, anche in questo caso, i risultati non siano troppo discostanti da quelli ottenuti in precedenza.

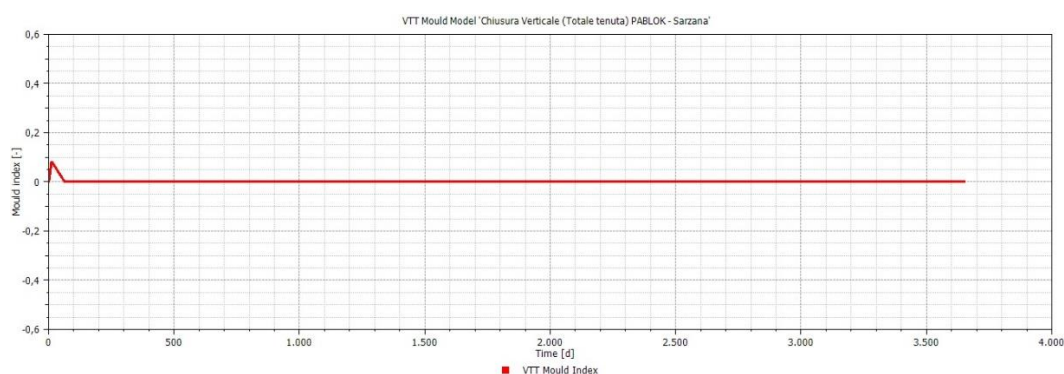


Figura 7.10 VTT Mold Model dell'interfaccia più critica - CV.01 (Sarzana – Totale Tenuta)

Si può quindi affermare che la terza soluzione risulta una valida alternativa a quella utilizzata nella scuola di Sarzana. Il freno a vapore interno riesce infatti a impedire la formazione di condensa nell'interfaccia dell'impermeabilizzante, mantenendo asciutta anche la zona più critica del pacchetto.

COPERTURA

Successivamente si è passati allo studio della copertura che, a differenza della chiusura verticale, presenta un unico strato realizzato con isolante a base biologica. In questo caso le interfacce sulle quali è stato applicato il VTT Mold Model sono state le due adiacenti alla paglia precompressa:

- Paglia - Top interface;
- Paglia - Bottom interface;

Anche per questo pacchetto le analisi hanno seguito il percorso riportato per la chiusura verticale, iniziando dalle condizioni climatiche reali e passando successivamente alle variazioni dei dati climatici e del pacchetto stratigrafico. Il periodo di calcolo è stato mantenuto anche in questo caso pari a dieci anni. Per comprendere la risposta dell'intero pacchetto alle condizioni climatiche a cui viene sottoposto, si riportano anche per la stratigrafia della copertura i grafici di:

- Temperatura

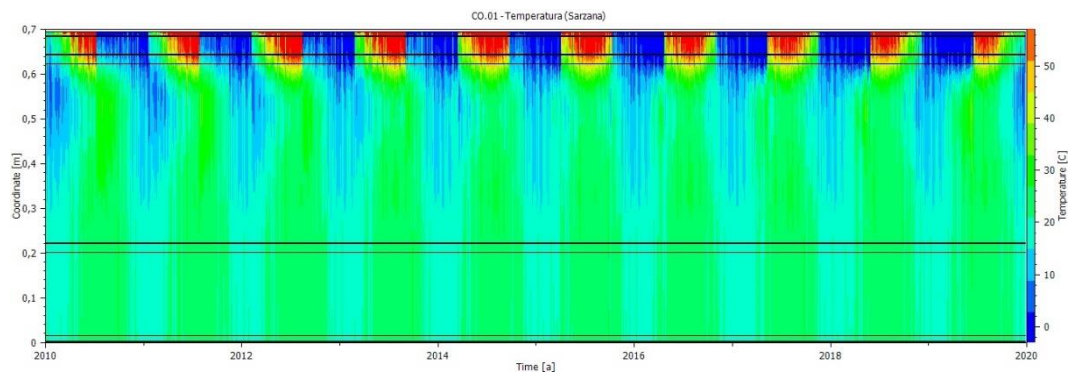


Figura 7.11 Profilo di temperatura CO.01 - (Sarzana)

- Umidità Relativa

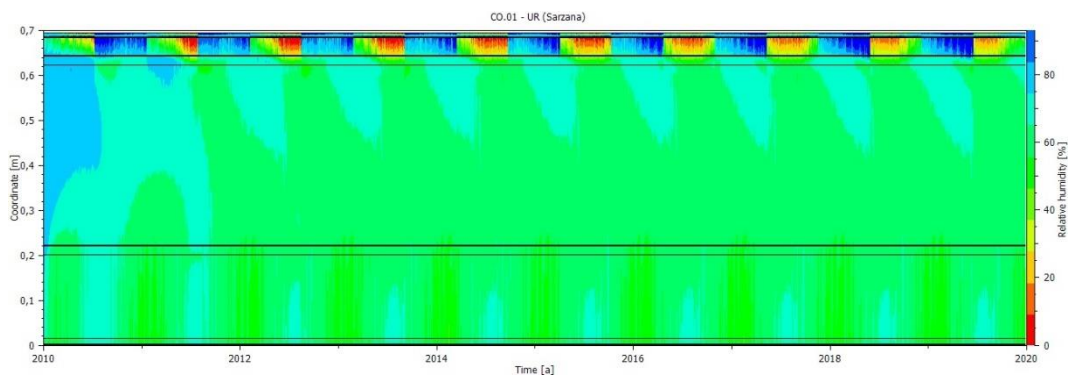


Figura 7.12 Profilo di umidità relativa CO.01 - (Sarzana)

- Pressione di Vapore

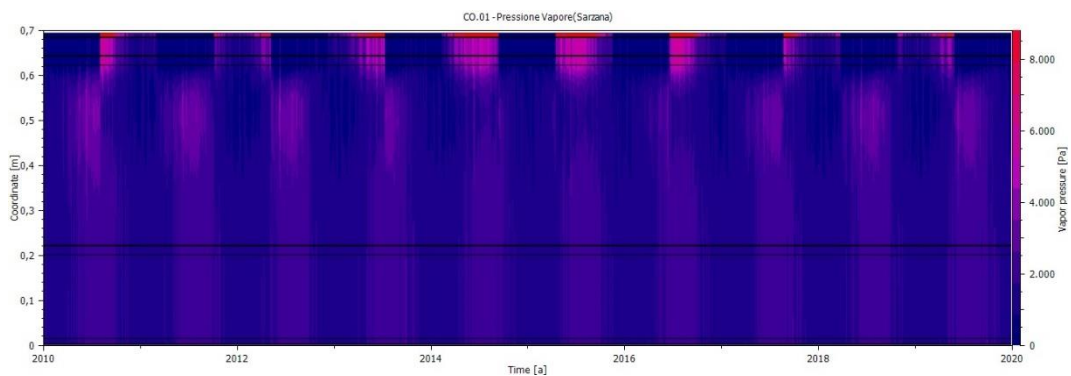


Figura 7.13 Profilo pressione di vapore CO.01 - (Sarzana)

Il processo è quindi continuato analizzando i valori di temperatura e umidità relativa delle due interfacce dell'isolante in paglia precompressa. Essendo presente un unico strato di isolamento, la differenza di temperatura e umidità relativa tra le due risulta più marcata e ben visibile. Già dal secondo di questi grafici (UR superfici – CO.01) è possibile notare come nella fase iniziale di vita del pacchetto si rilevino valori discostanti da quelli successivi. Questa criticità iniziale è del tutto normale e rappresenta il periodo di stabilizzazione tipico dei materiali biogenici. La paglia, come molti dei biobased material, subisce infatti un primo processo di assorbimento di umidità che viene succeduto da una fase di asciugatura del materiale, corrispondente a una stabilizzazione dello stesso. Come è possibile notare nella parte successiva del grafico, questo processo iniziale porta il materiale a una condizione di esercizio ottimale, che viene successivamente mantenuta per tutto il resto del ciclo di vita considerato.

- Temperatura superfici

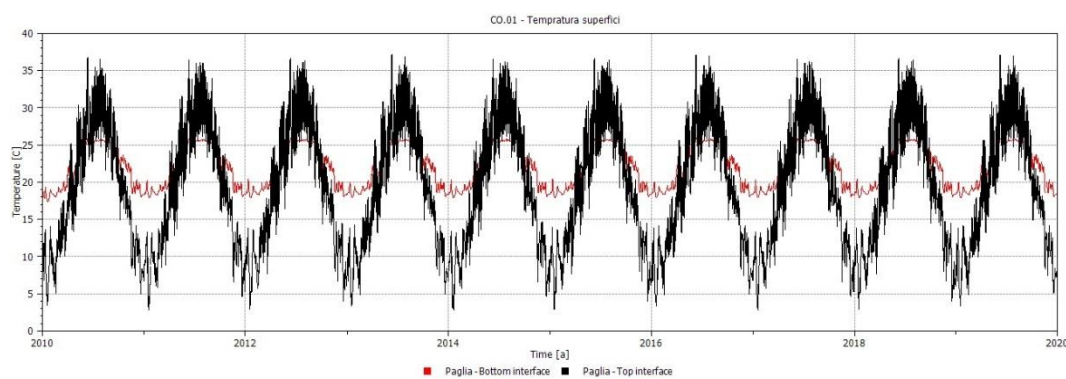


Figura 7.14 Profilo delle temperature superficiali - CO.01 (Sarzana)

- Umidità Relativa superfici

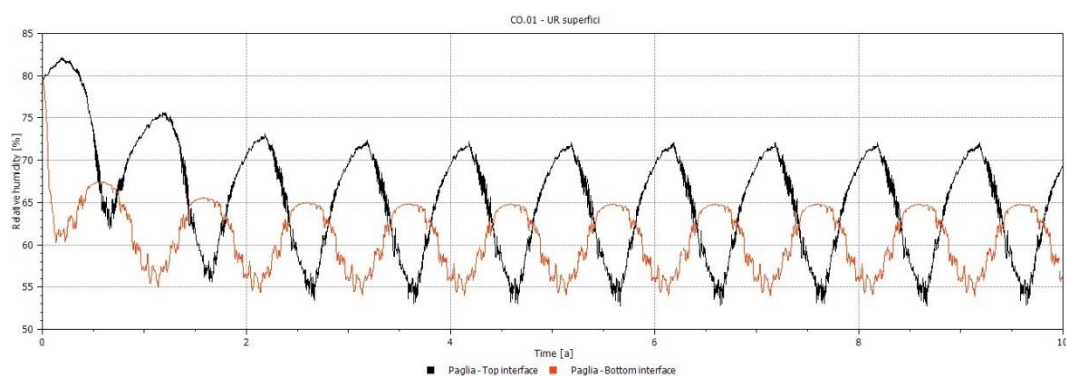


Figura 7.15 Profilo delle umidità relative superficiali - CO.01 (Sarzana)

Una volta ricavati anche i grafici relativi al VTT Mold Model, sono stati confrontati con quelli precedenti, per evidenziare l'impatto della stabilizzazione iniziale sul degrado del materiale. Se per lo strato interno, più protetto, si mantiene costante l'assenza di formazione di muffe, la stessa cosa non si può dire per l'interfaccia esterna. La fase iniziale di

assestamento viene infatti rispecchiata da un picco del grafico che, nel breve periodo successivo, percorre un processo di asciugatura che lo riporta al valore neutro iniziale, che viene poi mantenuto costante per tutto il resto del grafico. Seppur non trascurabile, il degrado iniziale del materiale è considerato accettabile e non genera problematiche nella successiva risposta del pacchetto.

- VTT Mold Model (Paglia - Bottom Interface)

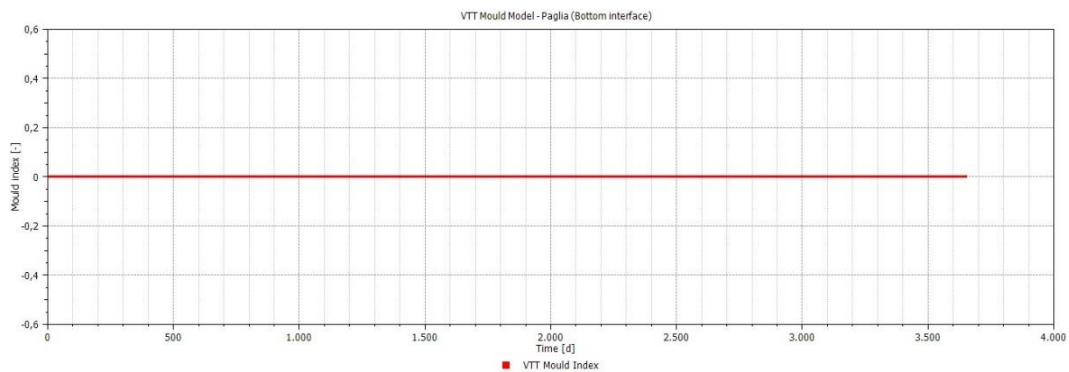


Figura 7.16 VTT Mold Model Paglia interfaccia interna - CO.01 (Sarzana)

- VTT Mould Model (Paglia - Top Interface)

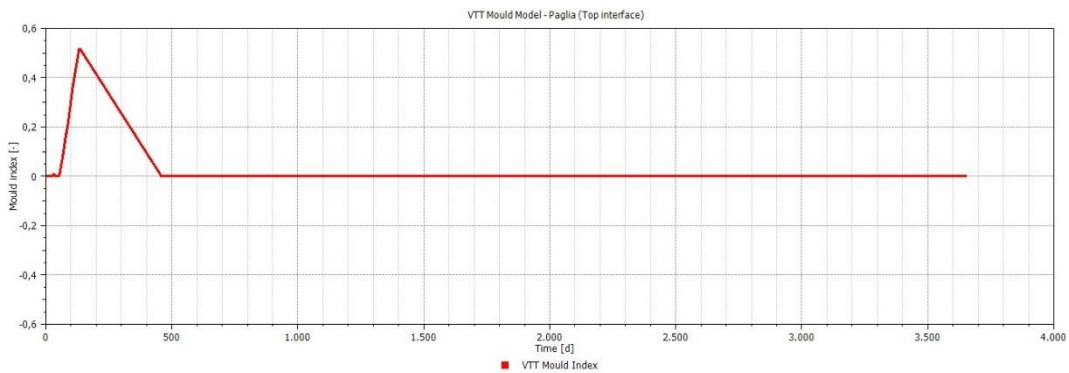


Figura 7.17 VTT Mold Model Paglia interfaccia esterna - CO.01 (Sarzana)

Per lo strato di copertura questo comportamento di assestamento iniziale dello strato superficiale è stato riscontrato nella maggior parte delle analisi effettuate. La risposta positiva nel resto del grafico è però rimasta costante, rendendo soddisfacenti i risultati anche per questo elemento.

Come per la chiusura verticale, anche nel caso della copertura è stata verificata l'attendibilità dei risultati del grafico del VTT Mold Model della zona più critica (Paglia – Interfaccia Superiore) confrontando i valori di Umidità Relativa effettivamente ottenuta e quelli dell'Umidità Relativa Critica ricavati attraverso la formula (1) presente nel capitolo 6.

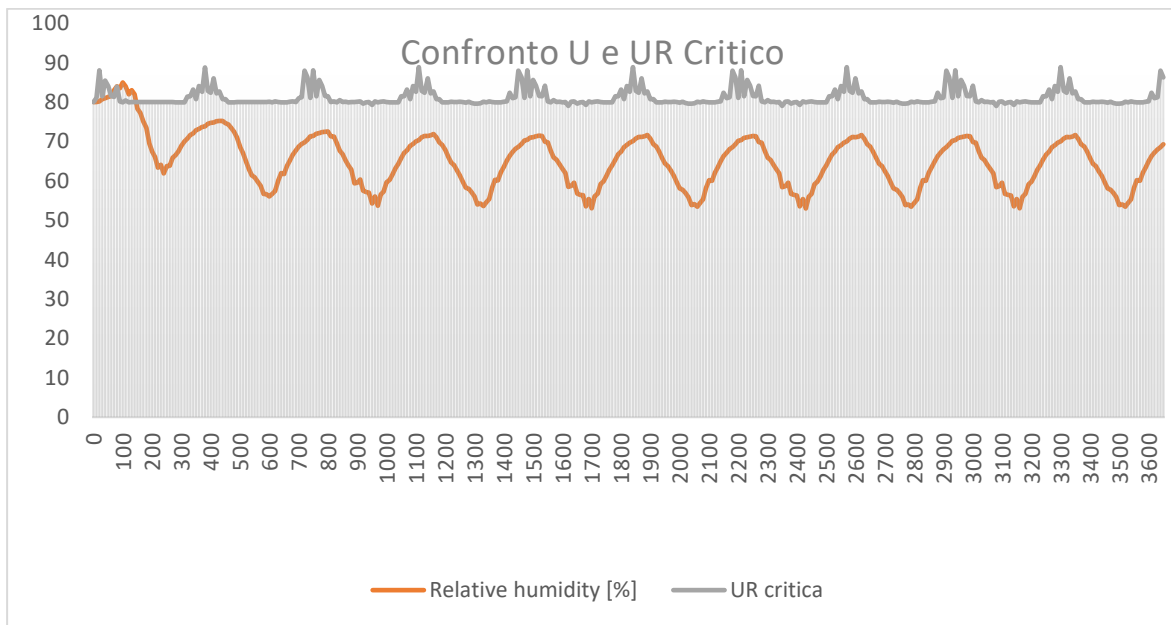


Figura 7.18 Confronto UR effettivo e UR critico CO.01 - (Sarzana)

Anche in questo caso si può notare come il grafico rispecchi i risultati ottenuti con il VTT Mold Model, evidenziando il principale superamento dell'UR critica nella fase iniziale e la successiva riduzione di umidità relativa fino alla completa stabilizzazione.

8 Conclusioni e sviluppi futuri

8.1 Limiti tecnici e normativi

Come è stato possibile comprendere, il percorso verso un costante utilizzo dei materiali a base biologica nel mondo delle costruzioni sta riscontrando sempre più interesse e, a causa della necessità di ridurre il più possibile le emissioni di carbonio, il tema della bio-edilizia è ormai un punto fondamentale nello sviluppo di nuove tecnologie. La paglia, come tanti altri materiali ottenuti da scarti dell'agricoltura, può rappresentare una vera soluzione che rivoluzionerebbe la tradizionale tecnica costruttiva che ci ha accompagnato fino ad oggi. La grande disponibilità di materiale, non utilizzato e quasi sempre in soprannumero, garantirebbe una produzione del tutto sostenibile, sia per assenza di emissioni di estrazione, sia per la decarbonizzazione che si garantirebbe durante il processo di crescita degli steli.

Seppur in continua evoluzione, esistono ancora alcuni limiti che impediscono a questi materiali di prendere il posto delle tecnologie tradizionali. Come evidenziato nello stato dell'arte di questo scritto, il tema della durabilità dei materiali biogenici è di estrema rilevanza per poter valutare l'applicabilità degli stessi nel mondo delle costruzioni. I differenti metodi spiegati per la valutazione della resistenza a decadimento nel tempo, sono tuttora poco applicabili nel campo dei biobased material.

Se per materiali come il legno, l'acciaio e il calcestruzzo armato esistono normative di riferimento per la corretta progettazione, per materiali come la paglia mancano di fatto protocolli normativi che ne regolamentino l'utilizzo. Questo comporta il conseguente scetticismo dei progettisti nello scegliere prodotti di cui non è possibile conoscere la totalità delle proprietà e che non presentano una risposta certa una volta in opera all'interno di un edificio.

La poca familiarità riguardo aspetti di questo tipo vincola infatti questo settore, rendendolo accessibile solamente a chi, oltre ad avere una conoscenza approfondita in materia, dispone della capacità tecnica ed economica per effettuare prove specifiche sul proprio prodotto, per valutarne le differenti caratteristiche e certificarne le proprietà.

Esistono però alcuni modelli matematici, come il VTT Mold Model applicato in questa tesi, che è possibile utilizzare all'interno delle simulazioni igrotermiche che sono considerati validi, consentendo di sviluppare simulazioni estremamente realistiche. La possibilità di inserimento di tutti gli input necessari alle analisi con la accurata caratterizzazione dei materiali permette infatti di ottenere risultati per lo più attendibili.

Questi, integrati ad analisi specifiche di laboratorio, consentono di raggiungere una buona conoscenza della risposta di un particolare elemento tecnico. L'esecuzione di queste prove su una scala notevolmente più vasta potrebbe quindi consentire una maggior comprensione del materiale stesso, definendone i limiti, le proprietà e il corretto metodo di utilizzo nell'edilizia moderna.

8.2 Analisi dei risultati

Per quanto riguarda il lavoro svolto all'interno di questa tesi, l'analisi igrotermica sui due pacchetti stratigrafici PABLOK ha dato risultati estremamente positivi. Entrambe le soluzioni hanno dimostrato di avere prestazioni ottime nel campo della durabilità e nella formazione di muffe. Gli unici valori riscontrati al di sopra della neutralità risultano infatti coerenti con il comportamento di un materiale biogenico messo in opera in una nuova costruzione.

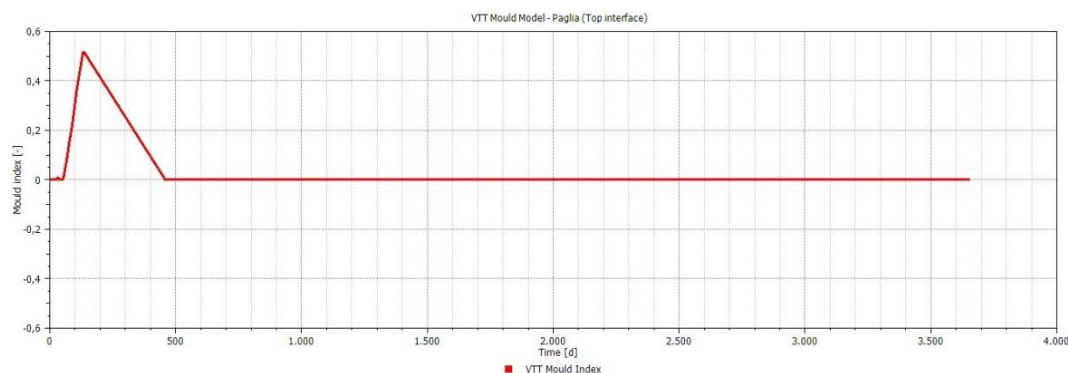


Figura 8.1 VTT Mold Model dell'interfaccia esterna paglia nella copertura - CO.01 (Sarzana)

I valori iniziali, laddove diversi da zero, evidenziano infatti l'impatto del primo ciclo invernale sul materiale stesso che, dopo il primo periodo di assorbimento di acqua, corrispondente anche ad un lieve degrado dell'elemento, è seguito da una fase di asciugatura e stabilizzazione. La risposta positiva del pacchetto viene mostrata dall'assenza di altri processi di questo tipo nella totalità del periodo di analisi considerato, confermando la bontà dello stato del materiale una volta raggiunto uno stato di stabilità.

Seppur anch'esso di origine naturale, è importante evidenziare come l'unico strato in cui sono comparsi segni di un minimo degrado è stato quello di isolamento esterno in lana di legno. La paglia, considerabile l'elemento più critico e soggetto alla formazione fungina, mantiene una condizione di stabilità per tutto il suo ciclo di vita. Viste le principali problematiche di questo materiale, analizzate all'interno del "capitolo 4", questa salubrità

riscontrata è del tutto positiva, permettendo ad entrambi i pannelli prefabbricati PABLOK di operare senza particolari rischi.

Grazie alla seconda parte di analisi si è invece potuto riscontrare come, un pacchetto destinato ad una zona climatica D (Sarzana), abbia la capacità di operare senza particolari problemi anche in due condizioni esterne differenti ed estreme, sia per quanto riguarda temperature massime e minime, che per i valori di umidità relativa. Seppur con qualche modifica di spessore, quindi, è possibile utilizzare questi elementi sulla totalità del nostro territorio.

Si può quindi affermare che i pacchetti analizzati hanno permesso una protezione sufficiente degli strati di isolamento da condizioni critiche di umidità relativa e per questo motivo può essere valutato come efficace.

Seppur del tutto positivi, è importante valutare i risultati con uno spirito critico, basato su studi simili presenti in letteratura, che hanno seguito un percorso analogo per estrapolare informazioni sulla durabilità della paglia o di altri materiali simili. Per quanto Delphin, attraverso l'applicazione del VTT Mold Model, possa essere considerato uno dei metodi più idonei alla valutazione della formazione di muffe sui materiali biogenici, non è sempre del tutto attendibile. Il modello di Viitanen, infatti, nasce per uno studio della durabilità su elementi legnosi, ovvero con una densità, una traspirabilità e una struttura differente rispetto alle balle di paglia considerate in questa tesi. È stato sviluppato per analizzare materiali che nascono per essere messi in opera con dimensioni ridotte, arrivando solo in casi estremi a raggiungere spessori assimilabili a quelli di una balla di paglia.

Anche se attraverso ulteriori studi specifici su differenti materiali da costruzione, il modello presentato per il legno da Hukka e Viitanen nel 1999, è stato sviluppato e modificato negli anni, quelli porosi di origine naturale non sono ancora stati inglobati. Nel 2011 infatti sono state apportate alcune modifiche alla struttura del modello per adattare meglio i diversi fenomeni di crescita di differenti elementi. [55] Questo perché attraverso analisi di laboratorio si è scoperto che con alcuni materiali la copertura di crescita della muffa potrebbe essere relativamente elevata già nell'area microscopica. Il modello risulta ora valido anche per materiali come il calcestruzzo, la lana di vetro e L'EPS, ma per materiali come la paglia e la canapa devono ancora essere effettuate ulteriori analisi.

È però importante sottolineare come in studi specifici di pannelli simili a quelli realizzati da GP Project srl [56] [57] [58], i risultati sono comunque stati positivi, senza particolari formazioni di muffe, se non in situazioni in cui l'assenza di membrane impermeabilizzanti influisse negativamente sul pacchetto causando infiltrazioni d'acqua e livelli elevati umidità relativa [58], e in casi in cui climi molto umidi e con temperature sfavorevoli portassero a problematiche di degrado [57]. Questo può in parte sostenere la positività dei grafici ottenuti attraverso le analisi, in cui il pacchetto si presenta ben strutturato e in cui la pioggia battente non influisce sui risultati. Resta di fatto necessario un confronto con test di laboratorio specifici su provini con stratigrafia analoga, in modo da valutare la precisione del modello

su materiali come la paglia e l'attendibilità di possibili studi futuri svolti con la stessa metodologia.

Sviluppi futuri

La bioedilizia è un settore in continua crescita e sviluppo e lo studio di materiali come la paglia può svilupparsi su diverse strade, per migliorare la conoscenza del comportamento a degrado di un pacchetto come quello realizzato dalla società GP Project srl. Seppur in maniera approfondita, all'interno di una tesi di laurea è necessario limitare gli aspetti da analizzare, in modo da seguire con una certa logica e qualità uno degli step di studio e approfondimento di un prodotto innovativo come PABLOK.

Un ulteriore sviluppo in direzione del tema trattato sarebbe l'analisi di tutti quei punti critici di collegamento dei blocchi prefabbricati che sono generalmente fonte dei maggiori problemi di infiltrazione di umidità e conseguente degrado del materiale. I nodi, in una struttura come quella presentata nel caso studio di Sarzana, possono rappresentare una nuova incognita per la durabilità del pacchetto, e lo sviluppo di un'analisi bidimensionale potrebbe completare il lavoro svolto fino ad ora sulle diverse conformazioni di pacchetti. Inoltre, si potrebbe effettuare una simulazione su tutti gli elementi di chiusura presenti in questo progetto, analizzando l'effetto della pioggia battente o modificando lo spessore degli isolanti e la traspirabilità delle membrane per osservare in che modo influenzino in risultato.

Un ultimo step effettuabile con un programma come Delphin potrebbe interessare la durata effettiva del test, che dai dieci anni considerati in queste analisi, potrebbe allungare il periodo di simulazione fino all'intera vita utile dell'edificio. In modo da identificare la necessità di effettuare sostituzioni intermedie. Anche l'utilizzo di un differente modello di crescita della muffa permetterebbe di verificare la corrispondenza di ciò che è stato ottenuto con il VTT Mold Model

Se ce ne fosse la possibilità, sarebbe interessante effettuare delle prove sperimentali sui provini prefabbricati. L'esecuzione di analisi igrometriche su un elemento reale, oltre a fornire la possibilità di confrontare in modo diretto i risultati ottenuti dalle analisi sperimentali, verificandone l'attendibilità e confermandone le conclusioni, darebbe la possibilità di ricavare le proprietà specifiche dei singoli materiali utilizzati. Ciò potrebbe permettere di correggere gli input delle analisi effettuate fino a questo momento, in cui alcuni dei diversi dati specifici sono stati estrapolati da un confronto della letteratura, e di rendere conseguentemente i risultati più precisi e attendibili.

Anche prove di invecchiamento accelerato su provini sarebbero di grande interesse, in modo da confrontare i risultati di prova diretta e indiretta. Così facendo si andrebbe a migliorare ulteriormente l'accuratezza del risultato matematico e quindi l'efficacia del modello.

La società GP Project srl, ha iniziato da poco a collaborare con uno dei più importanti produttori di sensori di monitoraggio presenti in Italia: Wood Control. Attraverso l'utilizzo di MyMeter le strutture realizzate con PABLOK sono mantenute costantemente sotto

controllo. Si tratta un sistema studiato per permettere di monitorare l'umidità nelle strutture realizzate in legno attraverso una serie di sensori distribuiti nei punti critici dell'edificio, che vengono gestiti facilmente tramite smartphone. Diverse strutture realizzate fino ad oggi, presentano infatti, all'interno dello strato isolante in balle di paglia prefabbricate, dei sensori utili a mantenere sotto un costante controllo le condizioni di umidità e temperatura dell'elemento biogenico. Grazie al continuo immagazzinamento di dati nel database del materiale, col passare del tempo sarà possibile realizzare un profilo di comportamento del pacchetto nelle differenti condizioni di operatività, raccogliendo sempre più informazioni utili alla comprensione della risposta di PABLOK ai climi esterni una volta messo in opera.

Oltre a ottimizzare la comparazione dei dati con quelli ottenuti in laboratorio, questa tecnologia potrebbe consentire di identificare un vero e proprio ciclo di vita del prodotto, valutandone la possibile durata in opera, la risposta a situazioni critiche, il degrado e la periodicità per una necessaria sostituzione a causa di deterioramento e perdita di prestazione. Questo consentirebbe di definire un vero e proprio Life Cycle Assessment per gli edifici realizzati con questa tecnologia, analizzandone quindi i costi di costruzione e manutenzione e confrontandoli con quelli di un edificio tradizionale.

Quelle elencate sopra sono soltanto alcune delle idee per proseguire ulteriormente lo sviluppo di questo argomento. Ogni dato, test e simulazione aggiuntiva fornisce infatti informazioni ulteriori sul materiale e affina la comprensione del suo comportamento nel tempo.

Bibliografia

- [1] R. Ahmadi, B. Souiri e M. Ebrahimi, «Evaluation of wheat straw to insulate fired clay hollow bricks as a construction material,» 2020.
- [2] G. Perrone, «Crescita economica e riduzione dei GHGs: un problema globale (Italian Review of Agricultural Economics),» 2019.
- [3] K. A. Ali, M. I. Ahmad e Y. Yusup, «Issues, impacts, and mitigations of carbon dioxide emissions in the building sector,» 2020.
- [4] G. Tlajji, P. Biwole, S. Ouldboukhitine e F. Pennec, «A Mini-Review on Straw Bale Construction,» 2022.
- [5] Z. Szalay e A. Zöld, «Definition of nearly zero-energy building requirements based on a large building sample,» 2014.
- [6] C. Europea, «Relazione sui progressi compiuti nell'Azione a favore del clima, comprendente la relazione sul funzionamento del mercato europeo del carbonio e la relazione sul riesame della direttiva 2009/31/CE relativa allo stoccaggio geologico del biossido di carbonio,» 2015.
- [7] R. B. V. Venkatarama, «Sustainable materials for low carbon buildings,» 2009.
- [8] C. Gargari, «Edificio ad energia quasi zero in un'ottica di ciclo di vita,» 2014.
- [9] G. Cellai e P. Gallo, «Migliorare le prestazioni energetiche degli edifici,» *Reed Business Information Ed.*, pp. 54-60, Gennaio 2004.
- [10] S. Cascone, R. Rapisarda e D. Cascone, «Physical properties of straw bales as a construction material: A review,» *Sustainability (Switzerland)*, vol. 11, 2019.
- [11] M. Yadav e M. Agarwal, «Biobased building materials for sustainable future: An overview,» *Materials Today: Proceedings*, 2021.
- [12] G. Marzeddu, M. Giua e F. Pampiro, «Pannelli destinati all'isolamento termico. Abbinamento sughero-lana,» *Quaderni del DRISS, dipartimento della ricerca per il sughero e la sevicoltura*, 2015.

- [13] C. Bibbiani, L. Incrocci e A. Pardossi, «Caratterizzazione di materiali granulari innovativi e analisi dei sistemi di pilotaggio della irrigazione con sensoristica a basso costo,» *ENEA, agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile*, 2013.
- [14] S. Amziane e M. Sonebi, «Overview on bio-based building material made with plant aggregate,» *RILEM Technical Letters*, 2016 .
- [15] C. Carletti, G. Cellai, G. Raffellini, F. Sciarpi e S. Secchi, «Materiali isolanti ecosostenibili e prestazioni termo-acustiche».
- [16] D. Bosia, R. Giordano e L. Savio, «Progetto locale ecocompatibile di filiera di prodotto: pannelli isolanti innovativi in lana di pecora,» 2011.
- [17] V. Göswein, J. Reichmann, G. Habert e F. Pittau, «Land availability in Europe for a radical shift toward bio-based construction,» *Sustainable Cities and Society*, 2021.
- [18] D. Peñaloza, M. Erlandsson e A. Falk, «Exploring the climate impact effects of increased use of bio-based materials in buildings,» 2016.
- [19] G. Sandin, G. Peters e S. M., «Life Cycle Assessment of construction material: the influence of assumptions in end-of-life modelling,» 2014.
- [20] G. Sciuto, S. Cascone, G. Evola e C. Baroetto Parisi, «Analisi delle prestazioni di involucri in paglia The effect of urban features and weather conditions on Urban Heat Stress View project,» 2019.
- [21] K. Wall, P. Walker, C. Gross, C. White e T. Mander, «Development and testing of a prototype straw bale house,» *Proceedings of Institution of Civil Engineers: Construction Materials*, vol. 165, pp. 377-384, 2012.
- [22] J. Carfrae, P. De Wilde, J. Littlewood, S. Goodhew e P. Walker, «Development of a cost effective probe for the long term monitoring of straw bale buildings,» *Building and Environment*, vol. 46, pp. 156-164, 2011.
- [23] F. D'Alessandro, F. Bianchi, G. Baldinelli, A. Rotili e S. Schiavoni, «Straw bale constructions: Laboratory, in field and numerical assessment of energy and environmental performance,» *Journal of Building Engineering*, vol. 11, pp. 56-68, 2017.
- [24] F. Rosso, A. Peduzzi, L. Diana e S. Cascone, «Un approccio sostenibile alla riqualificazione del patrimonio di edilizia pubblica residenziale: analisi energetica sperimentale e numerica ed analisi architettonica,» 2022.
- [25] B. Sodagar, D. Rai, B. Jones, J. Wihan e R. Fieldson, «The carbon-reduction potential of straw-bale housing,» *Building Research and Information*, vol. 39, pp. 51-65, 2011.
- [26] M. Bouasker, N. Belayachi, D. Hoxha e M. Al-Mukhtar, «Physical characterization of natural straw fibers as aggregates for construction materials applications,» vol. 7, pp. 3031-3048, 2014.
- [27] G. Mutani, C. Azzolino, M. Macri e S. Mancuso, «Straw buildings: A good compromise between environmental sustainability and energy-economic savings,» *Applied Sciences*, 2020.

- [28] G. Tlajji, S. Ouldboukhitine, F. Penneç e P. Biwole, «Thermal and mechanical behavior of straw-based construction: A review,» *Construction and Building Materials*, vol. 316, 2022.
- [29] J. Gibson, I. Welch e P. Barret, «Barley straw as an inhibitor of algal growth II: laboratory studies,» 1990.
- [30] T. Ashour, H. Georg e W. Wu, «An experimental investigation on equilibrium moisture content of earth plaster with natural reinforcement fibres for straw bale building,» 2011.
- [31] H. Wang, P. C. Chiang, Y. Cai, C. Li, X. Wang, T. L. Chen, S. Wei e Q. Huang, «Application of wall and insulation materials on Green building: A review,» 2018.
- [32] O. Curia, «Tecniche di costruzione in terra cruda,» p. 29.
- [33] A. Shea, K. Beadle e P. Walker, «Dynamic simulation and full-scale testing of a pre-fabricated straw-bale house,» 2010.
- [34] C. Buratti, E. Belloni, F. Merli, V. Zanella, P. Robazza e C. Cornaro, «An innovative multilayer wall composed of natural materials: Experimental characterization of the thermal properties and comparison with other solutions,» *Energy Procedia*, 2018.
- [35] B. Avon e B. Swartchick, «Straw bale seismic design capacities 2,» *Civili Engineering Senior These*, p. 38, 2014.
- [36] T. Alioua, B. Agoudjil, N. Chennouf, A. Boudenne e K. Benzarti, «Investigation on heat and moisture transfer in bio-based building wall with consideration of the hysteresis effect,» *Building and Environment*, p. 163, 2019.
- [37] B. Avon e B. Swartchick, «Scholar Commons Straw bale seismic design capacities 2,» 2014.
- [38] J. McCabe, «The thermal resistivity of straw bale construction,» 1993.
- [39] T. Ashour e W. Wu, «Using barley straw as building material,» *Nova Science Publishers Inc*, 2011.
- [40] G. Minke e M. Friedemann, «Building with straw: design and technology of a sustainable architecture,» 2005.
- [41] A. Chaussinand, J. L. Scartezzini e V. Nik, «Straw bale: A waste from agriculture, a new construction material for sustainable buildings,» *Energy Procedia*, 2015.
- [42] M. Viel, F. Collet, Y. Lecieux, M. L. M. François, V. Colson, C. Lanos, A. Hussain e M. Lawrence, «Resistance to mold development assessment of bio-based building materials,» *Composites Part B: Engineering*, vol. 158, pp. 406-418, 2019.
- [43] D. Lelievre, T. Colinart e P. Glouannec, «Hygrothermal behavior of bio-based building materials including hysteresis effects: Experimental and numerical analyses,» *Energy and Buildings*, vol. 84, pp. 617-627, 2014.
- [44] J. Langmans, A. Versele e S. Roels, «On the hygrothermal performance of straw bale wall elements in Belgium,» 2014.

- [45] M. Bouasker, N. Belayachi, D. Hoxha e M. Al-Mukhtar, «Physical characterization of natural straw fibers as aggregates for construction materials applications,» vol. 7, 2014.
- [46] H. Viitanen e T. Ojanen, «Improved Model to Predict Mold Growth in Building Materials,» 2007.
- [47] M. Lawrence, «Reducing the environmental impact of construction by using renewable materials,» pp. 163-174, 2015.
- [48] M. D. Summers, S. L. Blunk e B. M. Jenkins, «How Straw Decomposes: Implications for Straw Bale Construction».
- [49] M. Lawrence, A. Heath e A. Heath, «Determining moisture levels in straw bale construction,» vol. 23, 2009.
- [50] X. Yin, Q. Dong, M. Lawrence, D. Maskell, J. Yu e C. Sun, «Research on prediction model for durability of straw bale walls in warm (humid) continental climate-a case study in northeast china,» p. 13, 2020.
- [51] A. Thomson e P. Walker, «Durability characteristics of straw bales in building envelopes,» vol. 68, pp. 131-141, 2014.
- [52] J. Tripathi e R. W. Rice, «Finite Element Modelling of Heat and Moisture Transfer through Cross Laminated Timber Panels,» *Hybrid CLT panel*, 2019.
- [53] F. Mnasri, K. Abahri, M. E. Ganaoui, R. Bennacer e S. Gabsi, «Numerical analysis of heat, air, and moisture transfers in a wooden building material,» *Thermal Science*, vol. 21, pp. 785-795, 2017.
- [54] G. Pilloni, «Edilizia scolastica moderna ed ecosostenibile: la nuova Scuola nZEB “Poggi Carducci” di Sarzana».
- [55] O. Tuomo, P. Ruut, V. Hannu, L. Kimmo, V. Juha e S. Kati, «Classification of material sensitivity – New approach for mould growth modeling,» *9th Nordic Symposium on Building Physics*, 2011.
- [56] K. Holzhueter e K. Itonaga, « The Influence of Ventilated Rainscreens on the Interstitial Hygrothermal Environment of Straw Bale Walls,» *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, vol. 14, n. 1, pp. 205-212, 2015.
- [57] H. K. Chuen e K. Dimitrios, «Hygrothermal performance, energy use and embodied emissions in straw bale buildings,» *Energy & Buildings*, 2021.
- [58] H. Kyle e I. Koji, «An Evaluation of WUFI-Bio to Predict Mold Growth in Straw Bale Walls in Japan,» *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, pp. 357-362, 2017.
- [60] M. Viel, F. Collet, Y. Lecieux, M. L. M. François, V. Colson, C. Lanos, A. Hussain e M. Lawrence, «Resistance to mold development assessment of bio-based building materials,» *Composites Part B: Engineering*, vol. 158, pp. 406-418, 2019.

Tesi

Beatrice Piccirillo, *La paglia negli interventi di riqualificazione*, Tesi di laurea, Politecnico di Torino, 2020.

Luca Santagostini, *Progettare con la paglia: verso l'industrializzazione e la riprogettazione modulare del sistema Pablok*, Tesi di laurea, Università di Pavia, 2018.

K. Le Doujet, *Opportunities for the larg scale implementation of straw based external insulation as a retrofit solution of existig UK buildings*, Master, Downing College, 2009.

Maria Luisa Miccoli, *Materiali costruttivi a basso impatto ambientale: La Terra Cruda*, Tesi di Laurea, Università degli studi di Napoli "Federico II".

Davide Peroni, *Analisi LCA delle case di paglia di Pescomaggiore (AQ)*, Tesi di Laurea, Università di Bologna, 2010.

Gabriele Lumia, *Bio-based insulation materials: an opportunity for the renovation of European residential building stock*, Tesi di Laurea, Politecnico di Milano, 2017.

Jakub Wihan, *Humidity in straw bale walls and its effect on te decomposition of straw*, Tesi di Laurea, University of East London School of Computing and Technology, 2007.

Lorenzo Nespoli, *Analysis of heat and moisture transfer in building components by conjugate modeling*, Tesi di Laurea, Politecnico di Milano, 2012/2013.

Laura Mora Dal Verme, Sara Pellegrini, Maddalena Servalli, *NYMPHAEA Rigenerazione climate-neutral dell'area ex-industriale delle Fornaci di Caldè*, Tesi di Laurea, Politecnico di Milano, 2020/2021.

Sitografia

www.lafocahouse.com (consultato il 02/01/2023) – Platform Frame

www.lan-architetture.org (consultato il 06/01/2023) – Adobe

www.architetturaecosostenibile.it (consultato il 07/01/2023) – Argilla e Paglia

www.akzero.org (consultato il 07/01/2023) – Terra paglia

www.progettarebioedile.it (consultato il 08/01/2023) – Biobased Material

www.unionfoam.it (consultato il 08/01/2023) – Biobased Material

www.perlite.it (consultato il 09/01/2023) – Perlite

www.ediltecnico.it (consultato il 12/01/2023) – Lana di Pecora

www.caseinpaglia.it (consultato il 15/01/23) – Resistenza al Sisma

www.gazzettadalba.it (consultato il 23/01/23) – Casa Rinaudi

www.legnoarchitettura.com (consultato il 23/01/23) – Strawbale House Vicenza

www.archdaily.com (consultato il 23/01/23) – Strawbale House Vicenza

www.divisare.com (consultato il 25/01/23) – Scuola dell'infanzia

www.archinect.com (consultato il 25/01/23) – A recipe to Live

www.cyclifier.org (consultato il 25/01/23) – A recipe to Live

www.novellocasedipaglia.it (consultato il 25/01/23) – Casa di paglia a Chamois

www.edificidipagliaitalia.com (consultato il 25/01/23) – Larixhaus

www.novellocasedipaglia.it (consultato il 28/01/23) – Casa di riso a Torino

www.architonic.com (consultato il 28/01/23) – House Simma

www.bricoportale.it (consultato il 29/01/23) – Metodo Nebraska

www.bioconstruibile.wordpress.com (consultato il 29/01/23) – Sistema GREB

www.shutterstock.com (consultato il 29/01/23) – Sistema a cassoni

www.inarquia.es (consultato il 29/01/23) – Casa in Adobe

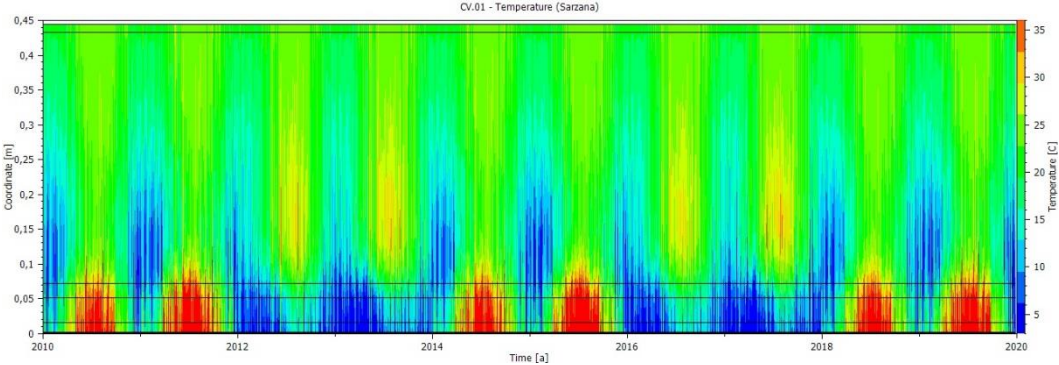
www.pablok.it (consultato il 16/02/23) – Sistema Pablok

ALLEGATO A

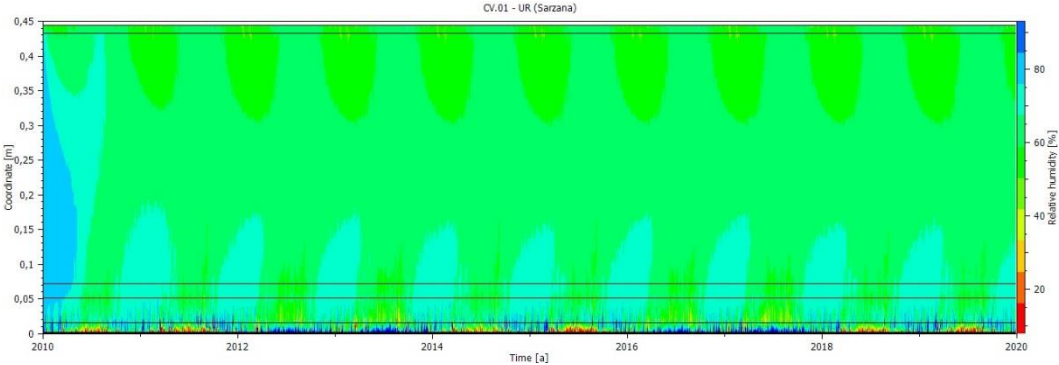
CHIUSURA VERTICALE

Stratigrafia chiusura verticale PABLOK (Sarzana)

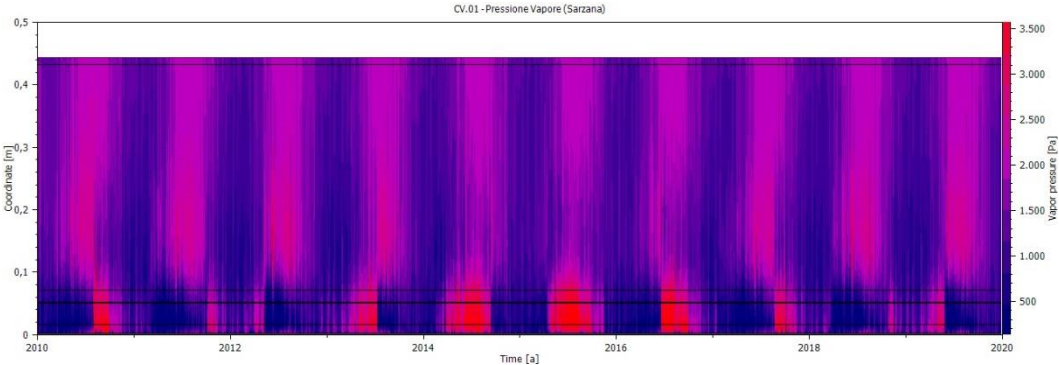
- Temperatura



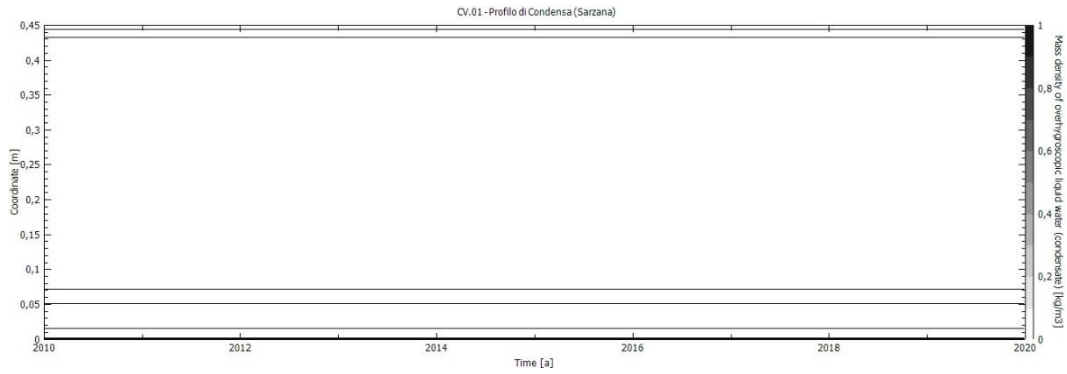
- Umidità Relativa



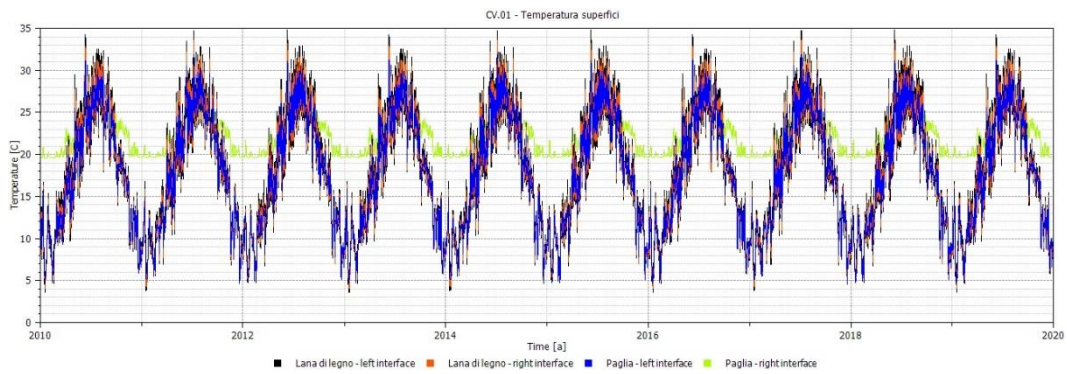
- Pressione di Vapore



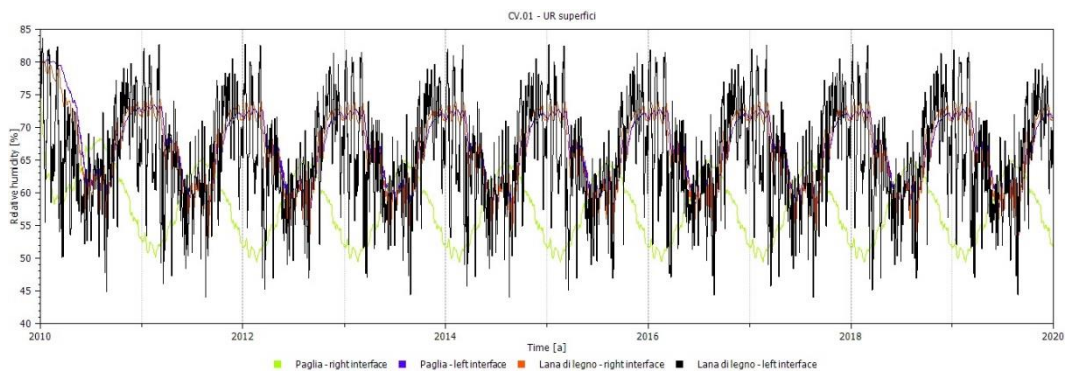
- Profilo di condensa



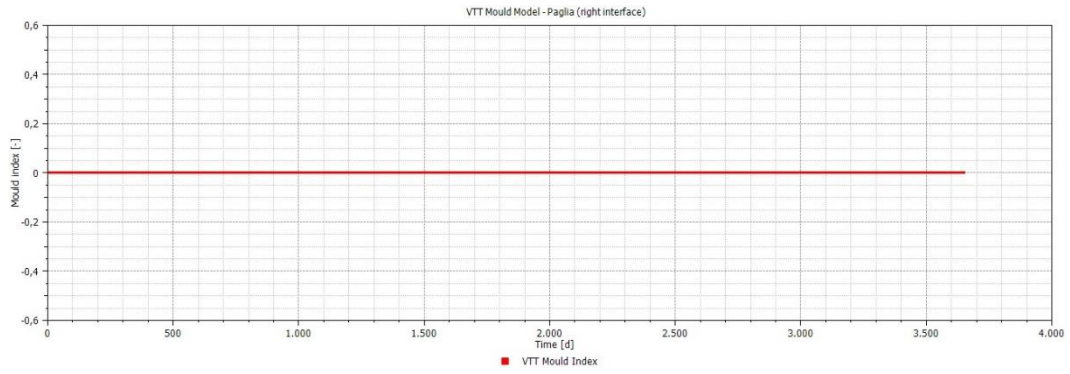
- Temperatura superfici



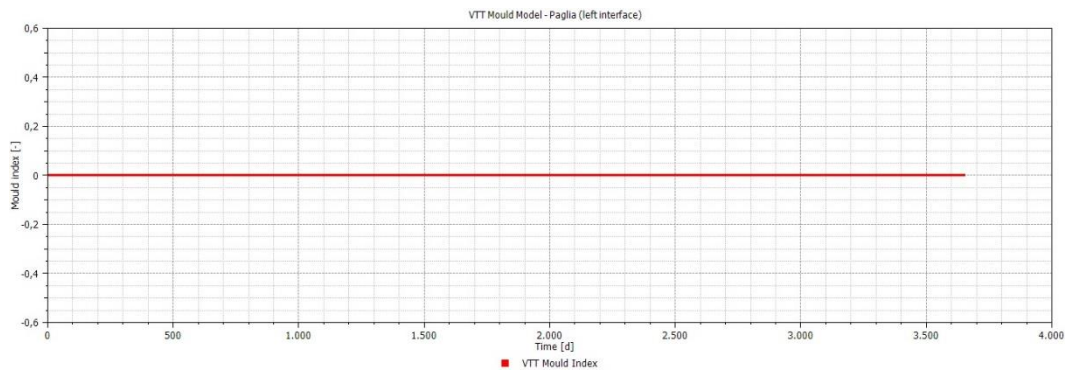
- Umidità Relativa superfici



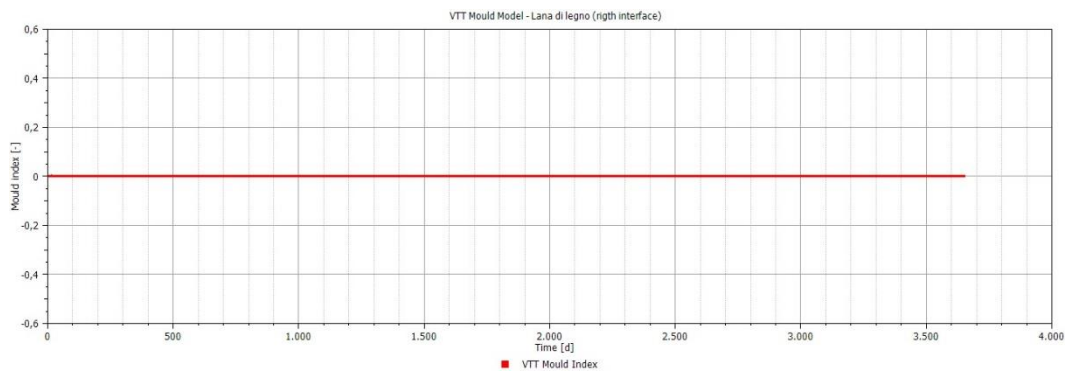
- VTT Mold Model (Paglia - Right Interface)



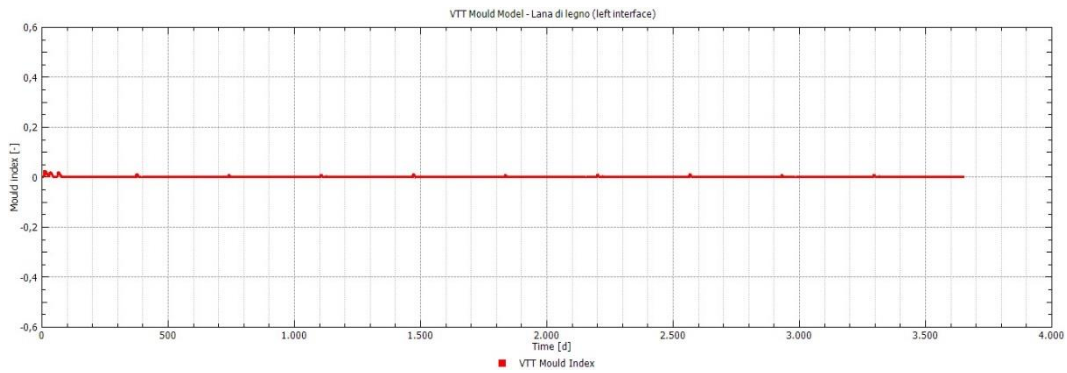
- VTT Mold Model (Paglia - Left Interface)



- VTT Mold Model (Lana di Legno - Right Interface)

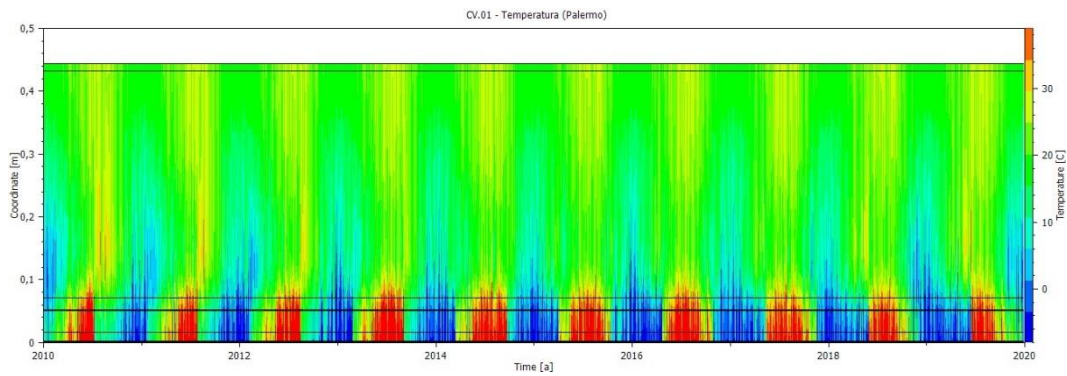


- VTT Mold Model (Lana di Legno - Left Interface)

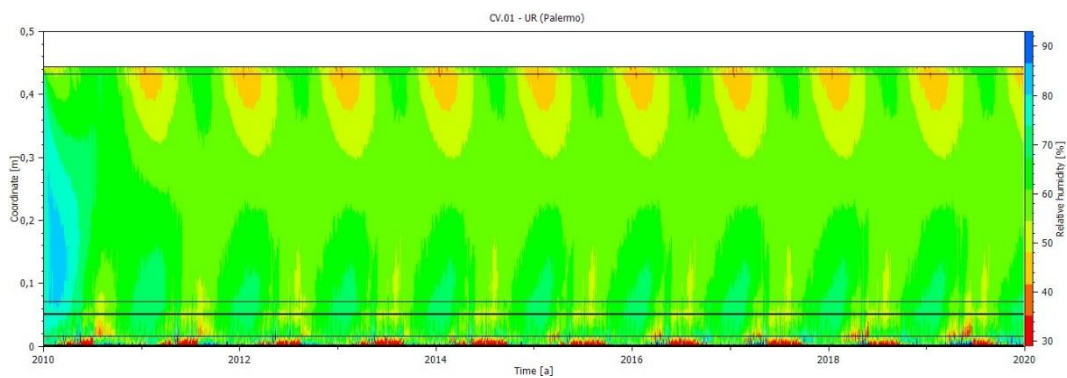


Stratigrafia chiusura verticale PABLOK (Palermo)

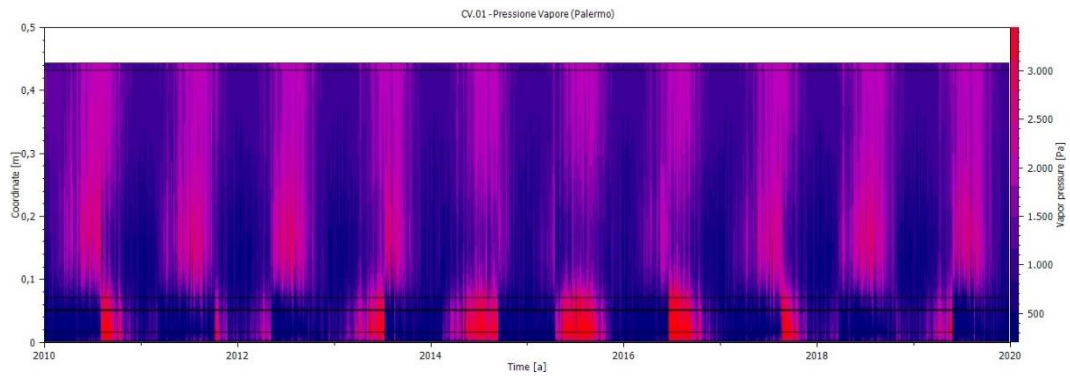
- Temperatura



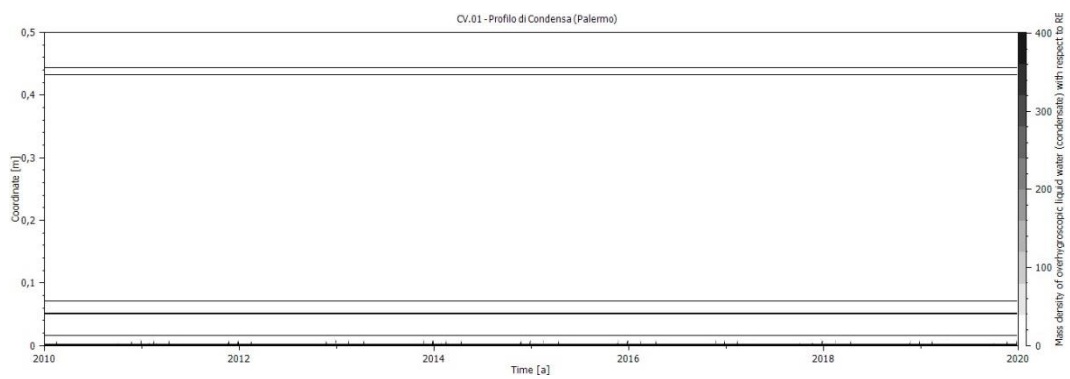
- Umidità Relativa



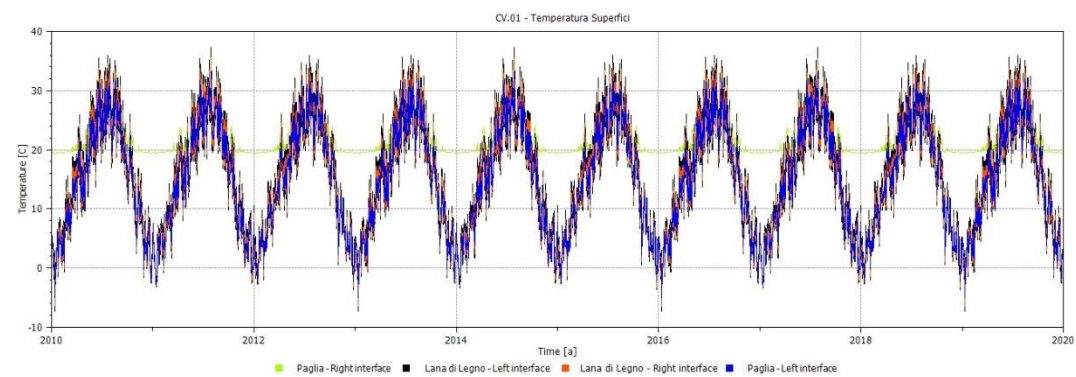
- Pressione di Vapore



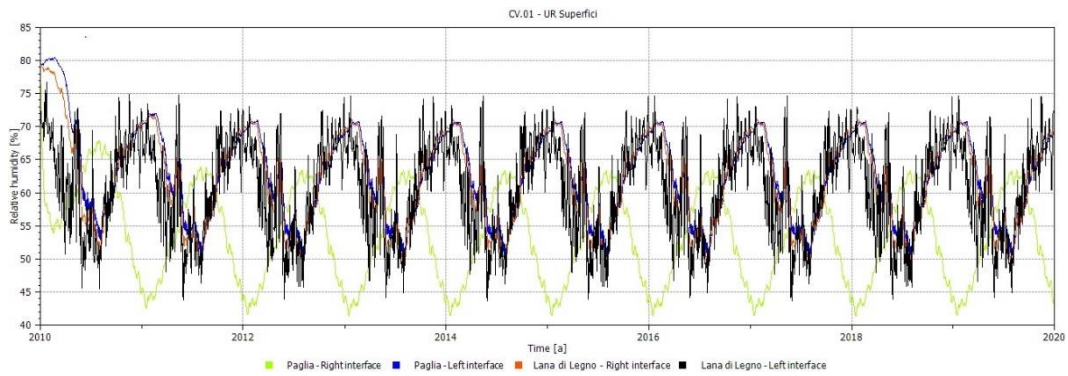
- Profilo di condensa



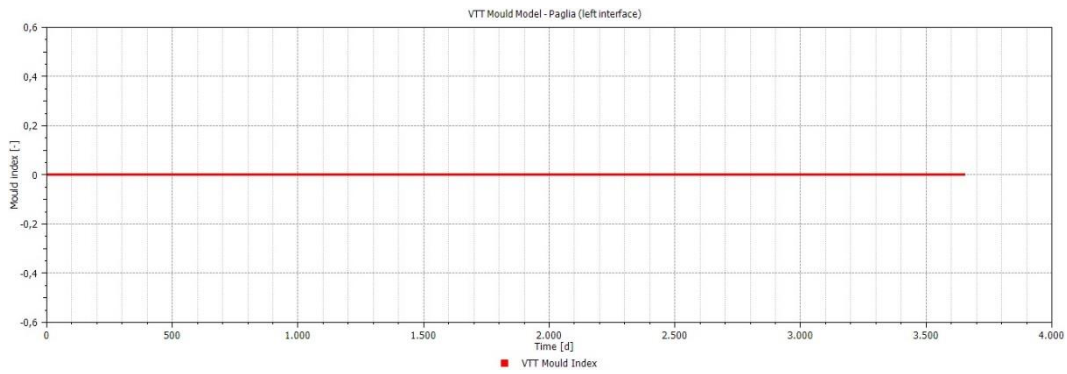
- Temperatura superfici



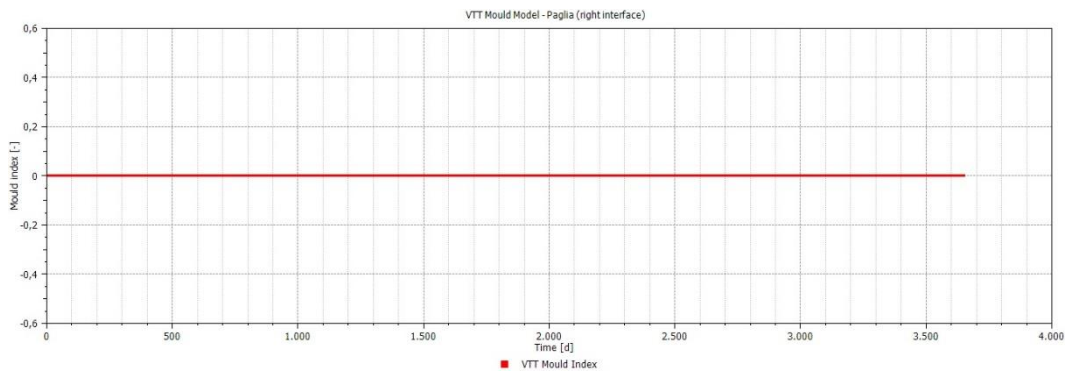
- Umidità Relativa superfici



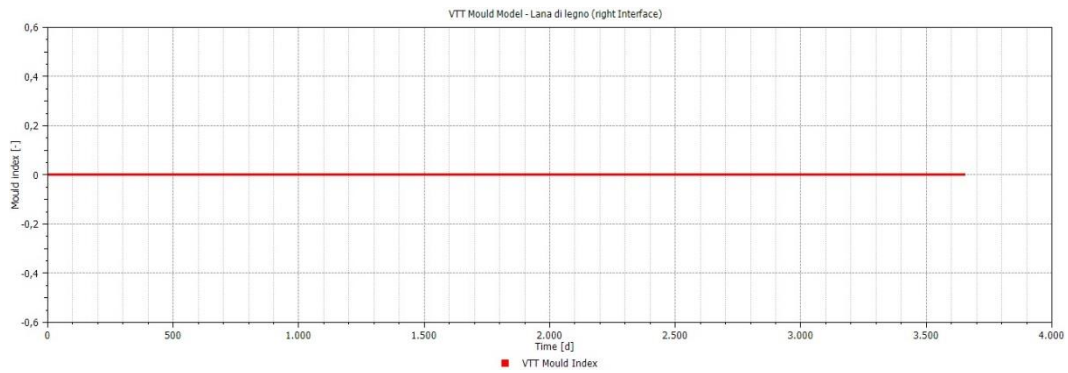
- VTT Mold Model (Paglia - Right Interface)



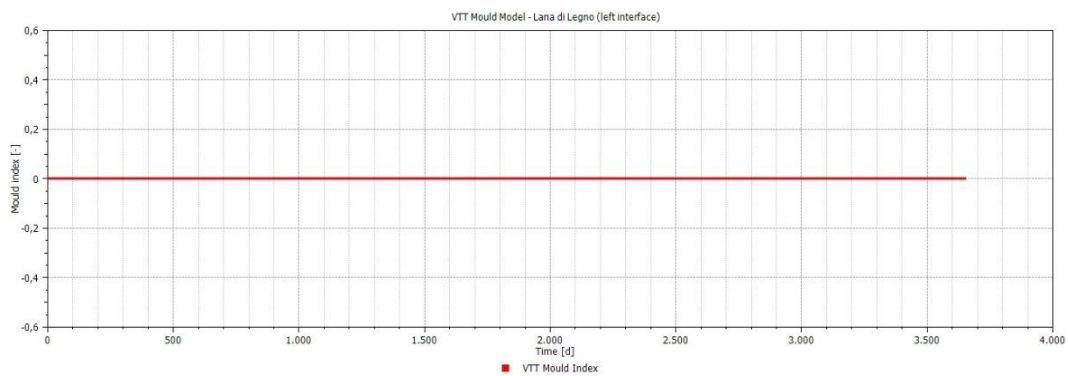
- VTT Mold Model (Paglia - Left Interface)



- VTT Mold Model (Lana di Legno - Right Interface)

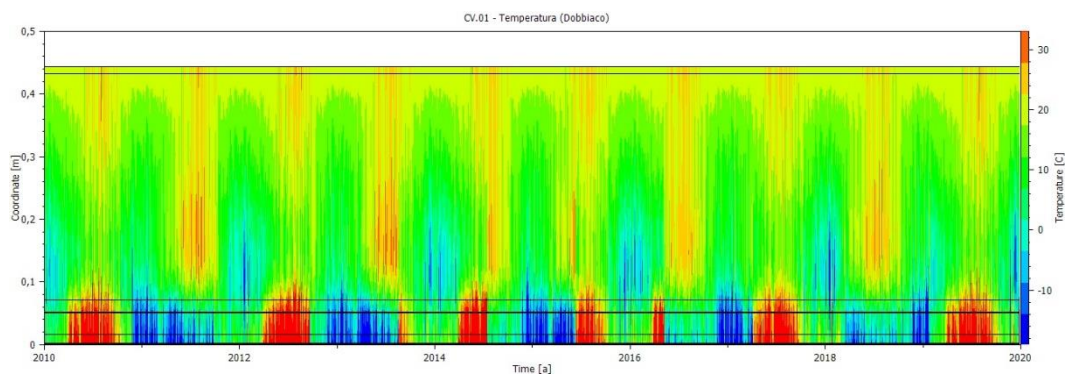


- VTT Mold Model (Lana di Legno - Left Interface)

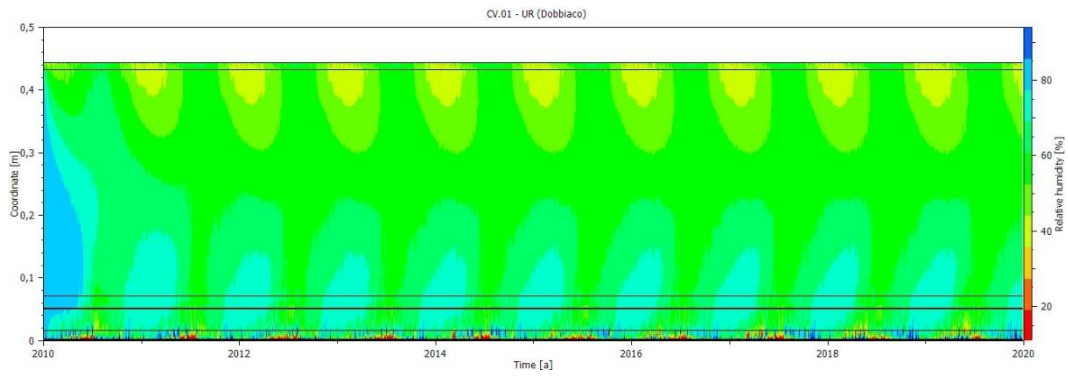


Stratigrafia chiusura verticale PABLOK (Dobbiaco)

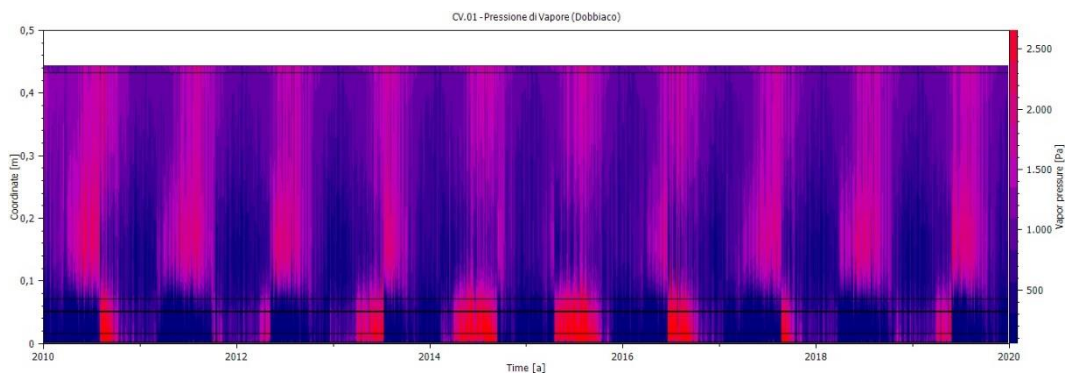
- Temperatura



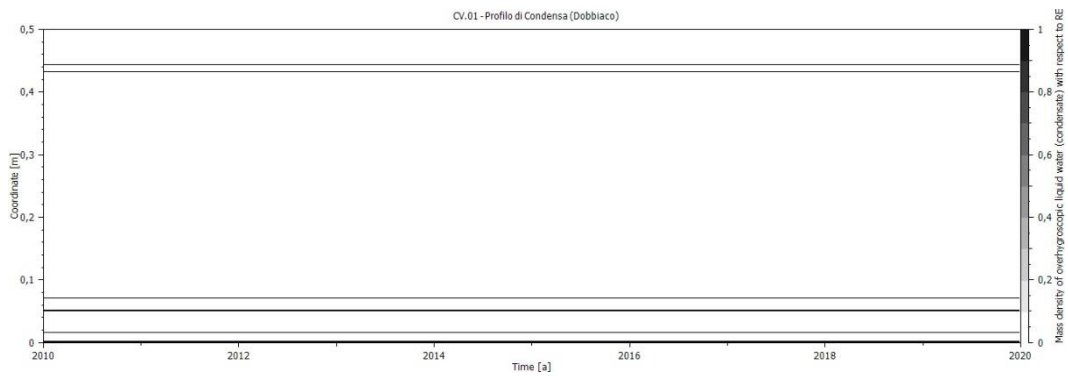
- Umidità Relativa



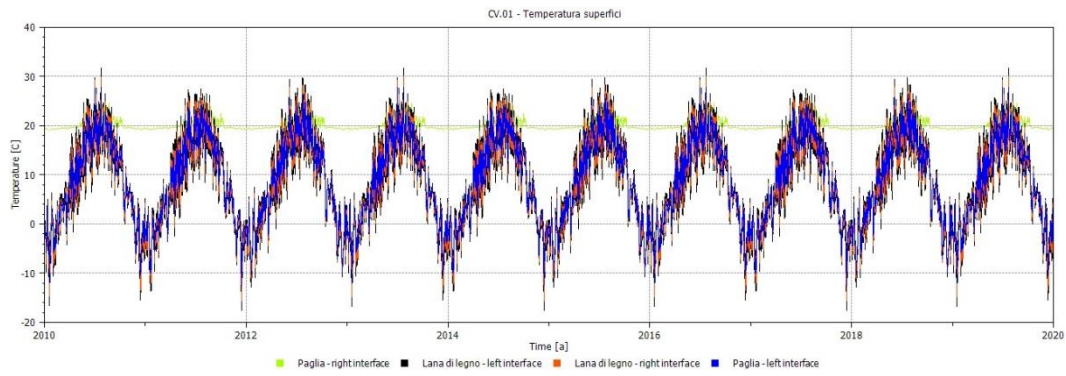
- Pressione di Vapore



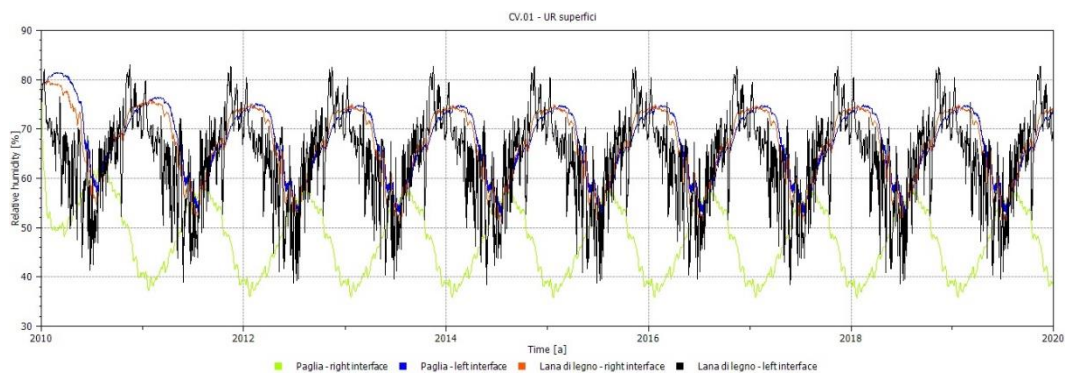
- Profilo di condensa



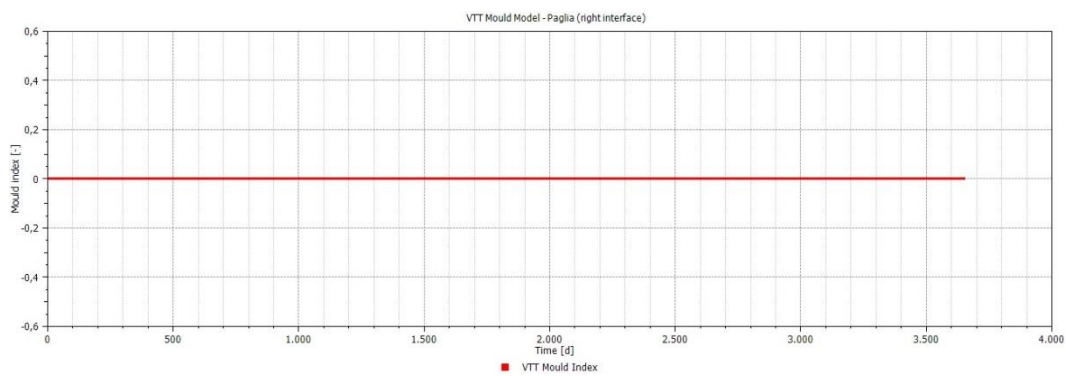
- Temperatura superfici



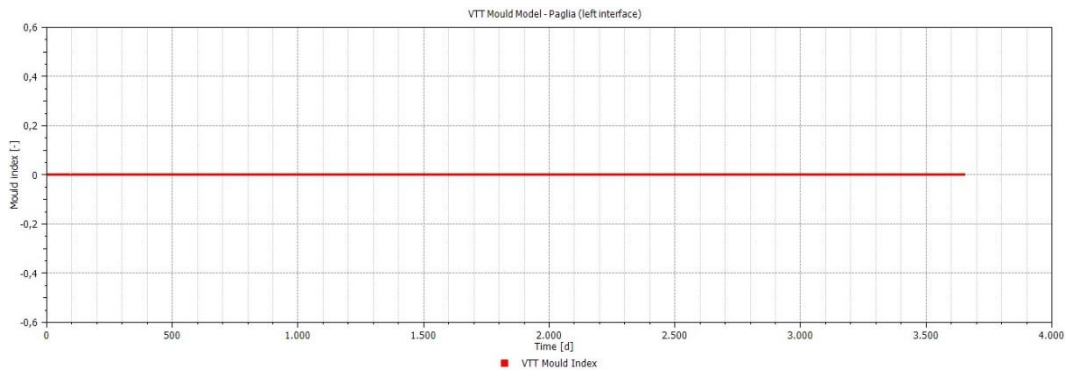
- Umidità Relativa superfici



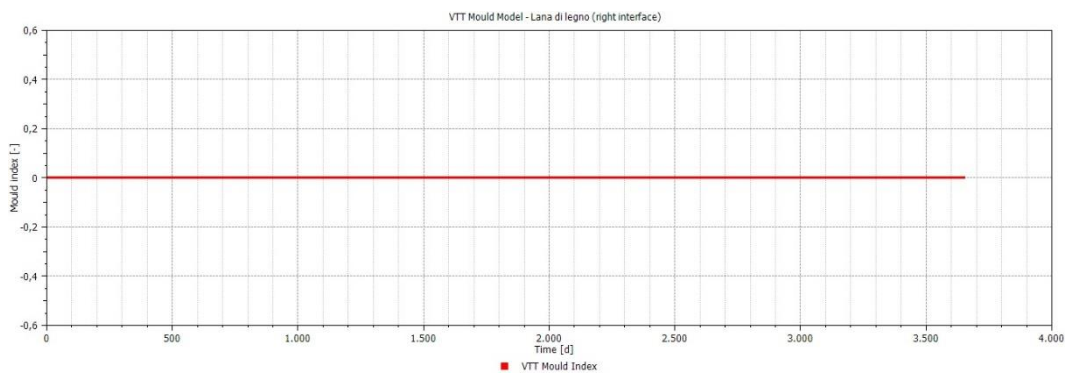
- VTT Mold Model (Paglia - Right Interface)



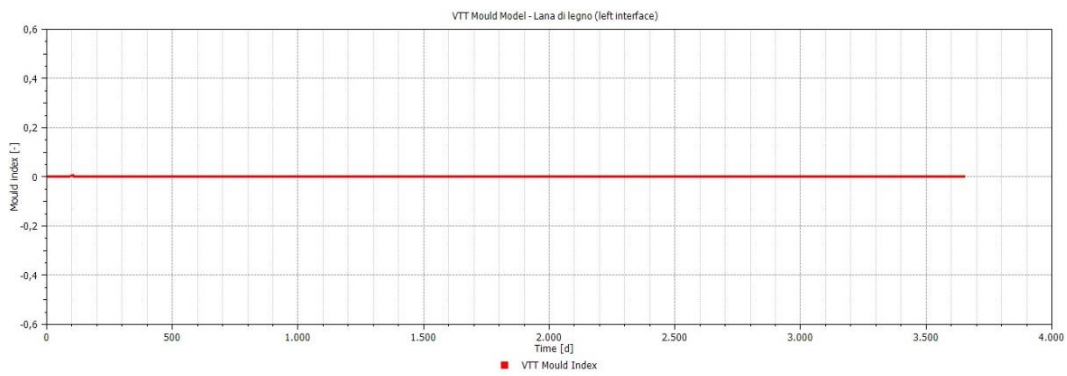
- VTT Mold Model (Paglia - Left Interface)



- VTT Mold Model (Lana di Legno - Right Interface)

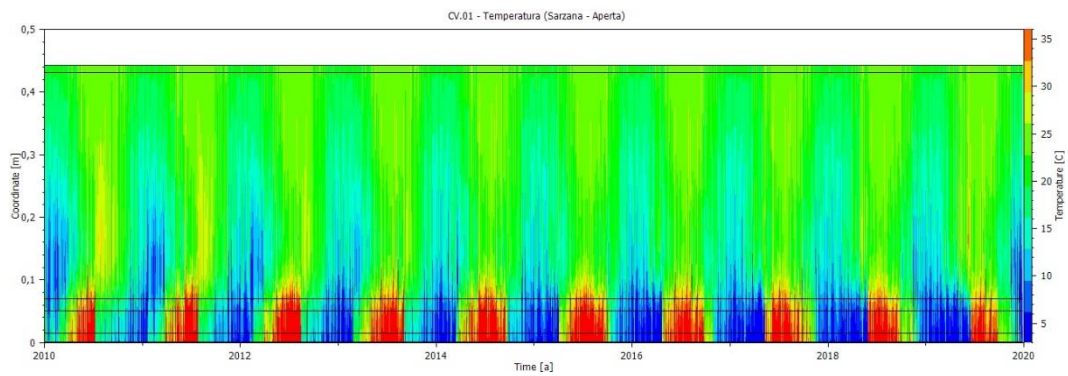


- VTT Mold Model (Lana di Legno - Left Interface)

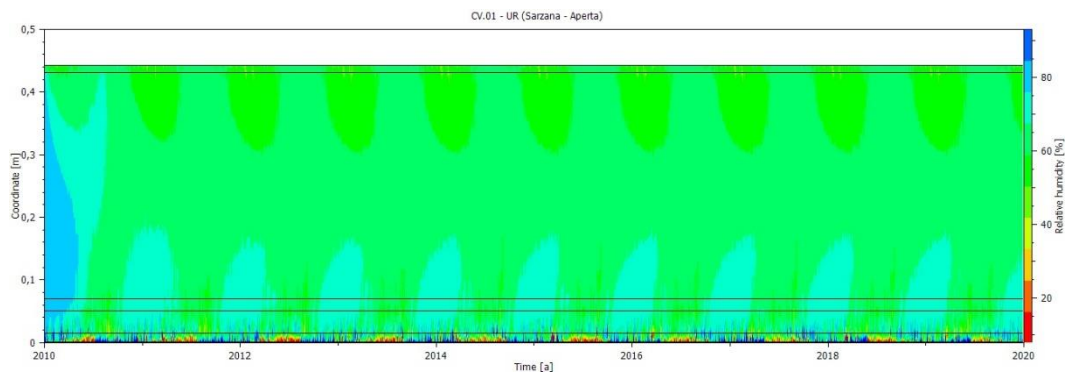


Stratigrafia chiusura verticale PABLOK Aperta (Sarzana)

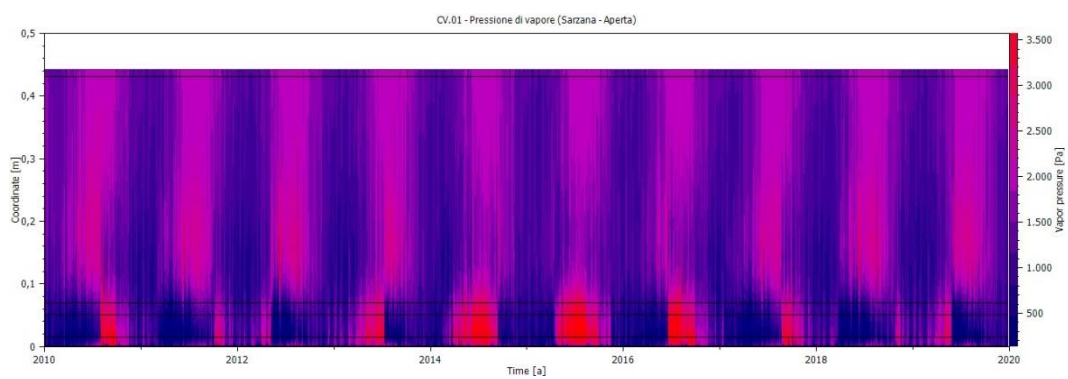
- Temperatura



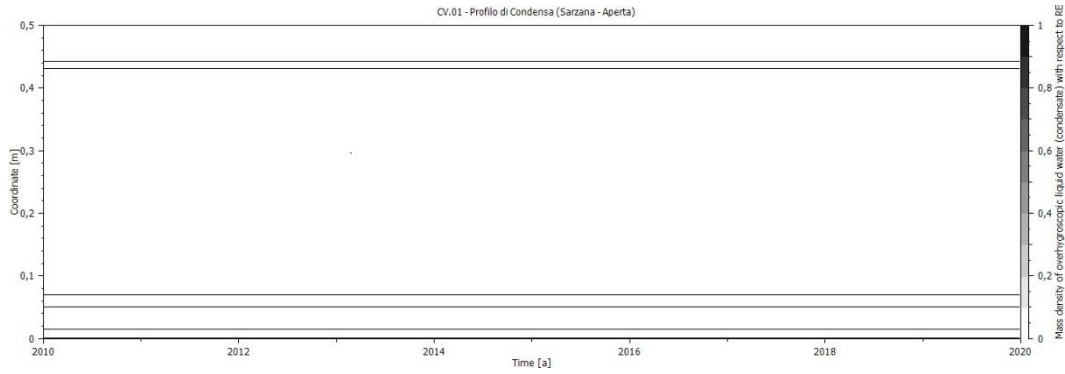
- Umidità Relativa



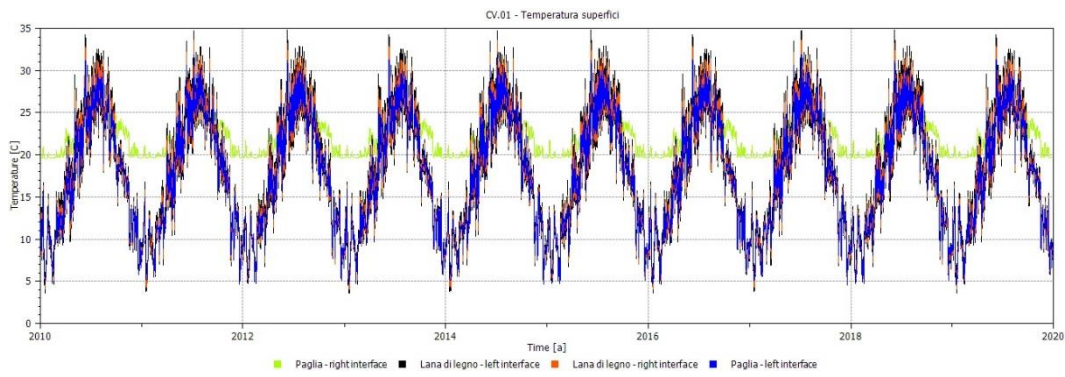
- Pressione di Vapore



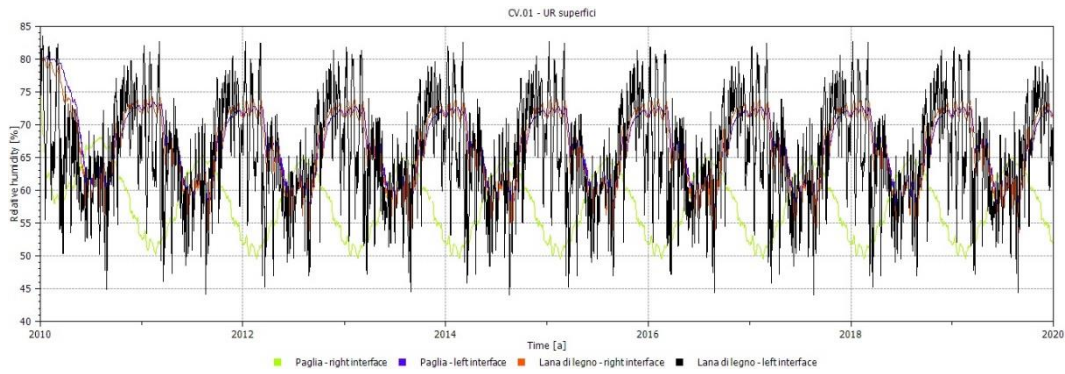
- Profilo di condensa



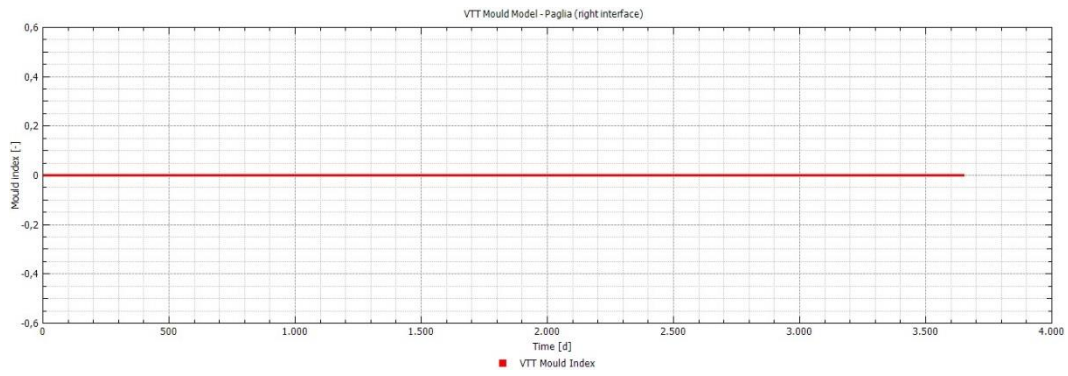
- Temperatura superfici



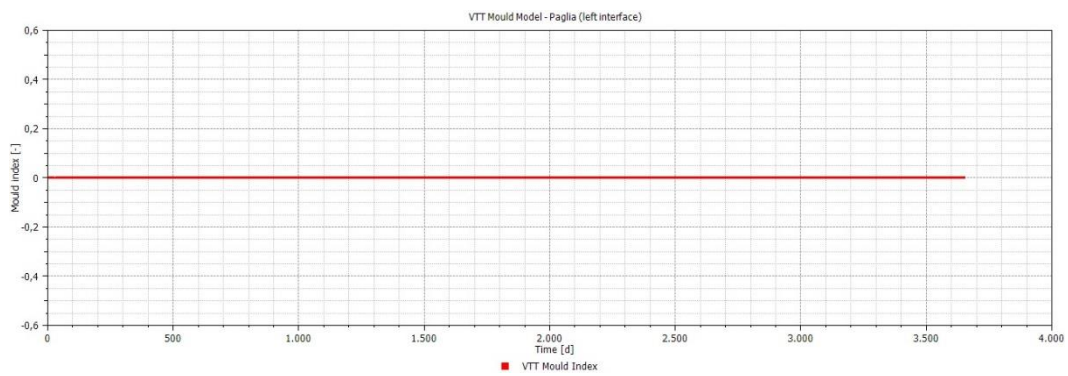
- Umidità Relativa superfici



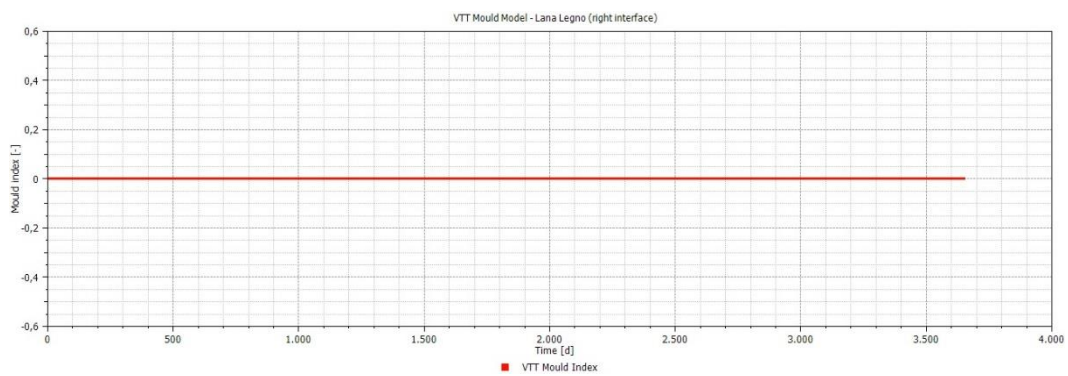
- VTT Mold Model (Paglia - Right Interface)



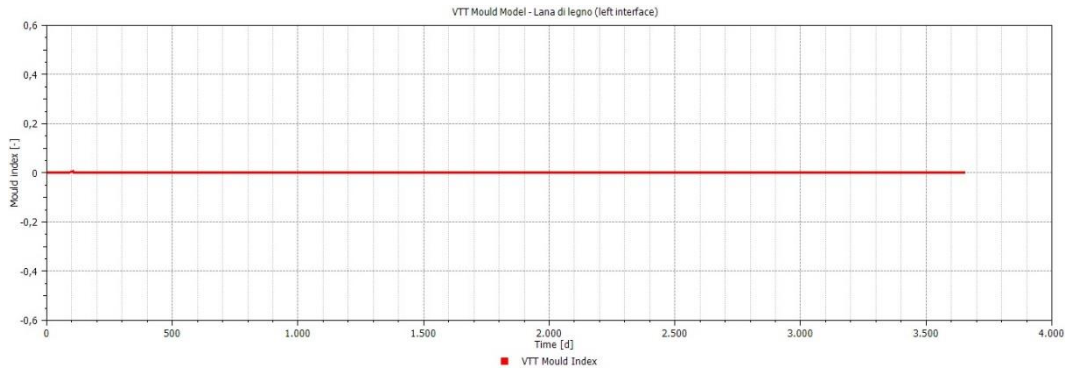
- VTT Mold Model (Paglia - Left Interface)



- VTT Mold Model (Lana di Legno - Right Interface)

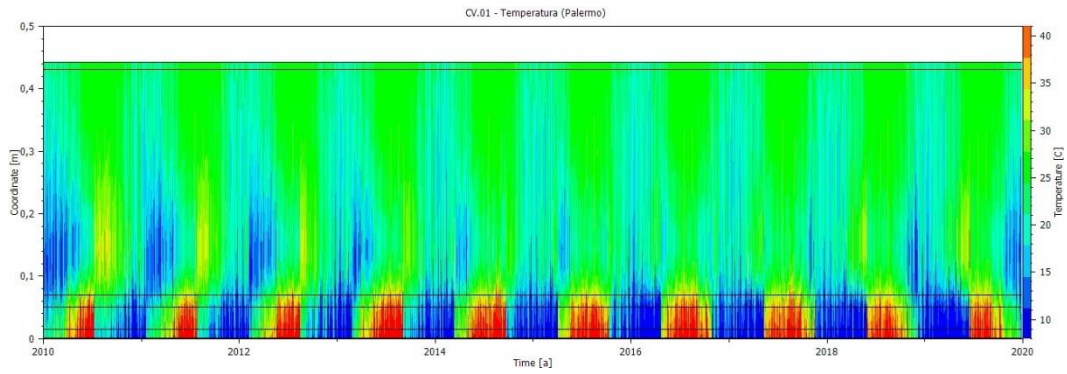


- VTT Mold Model (Lana di Legno - Left Interface)

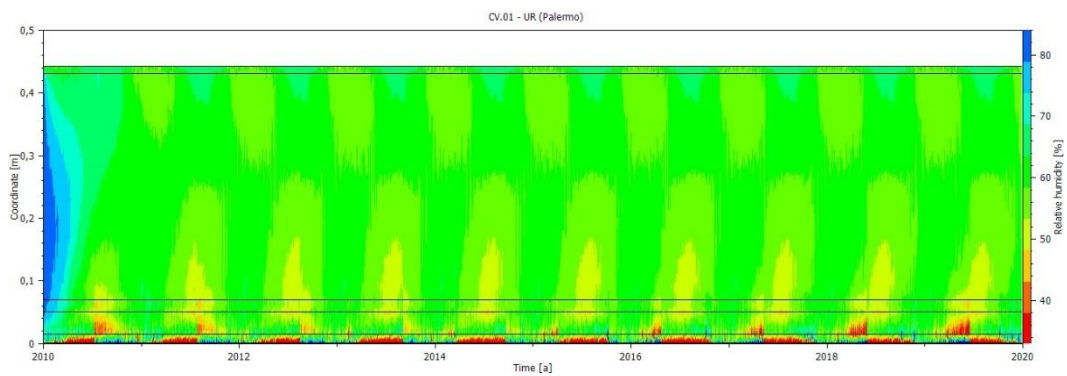


Stratigrafia chiusura verticale PABLOK Aperta (Palermo)

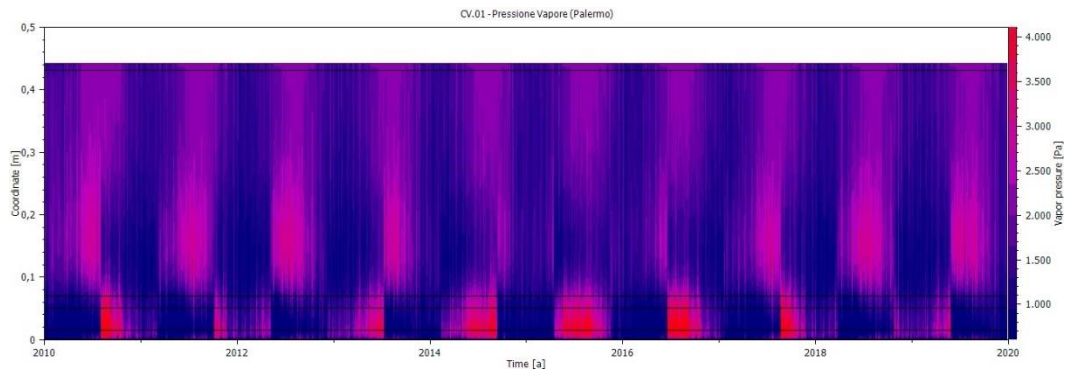
- Temperatura



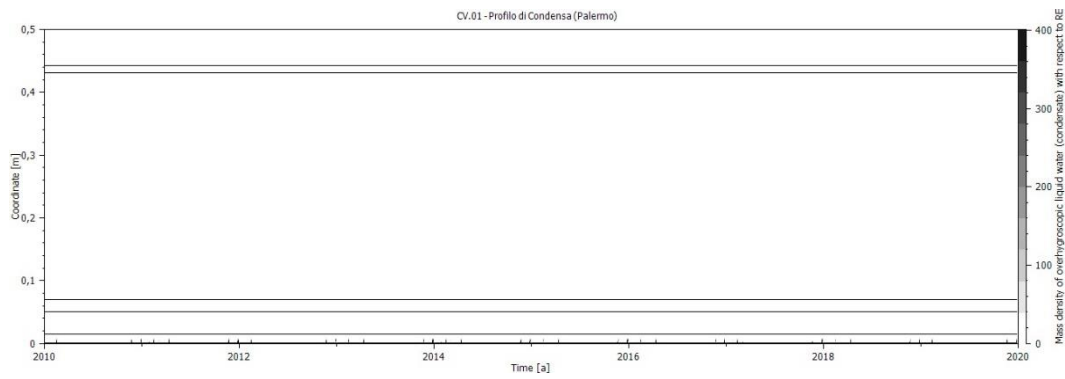
- Umidità Relativa



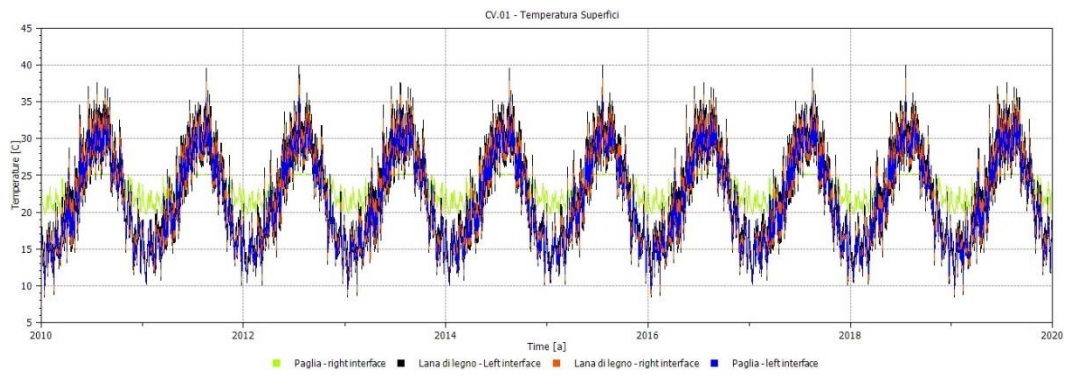
- Pressione di Vapore



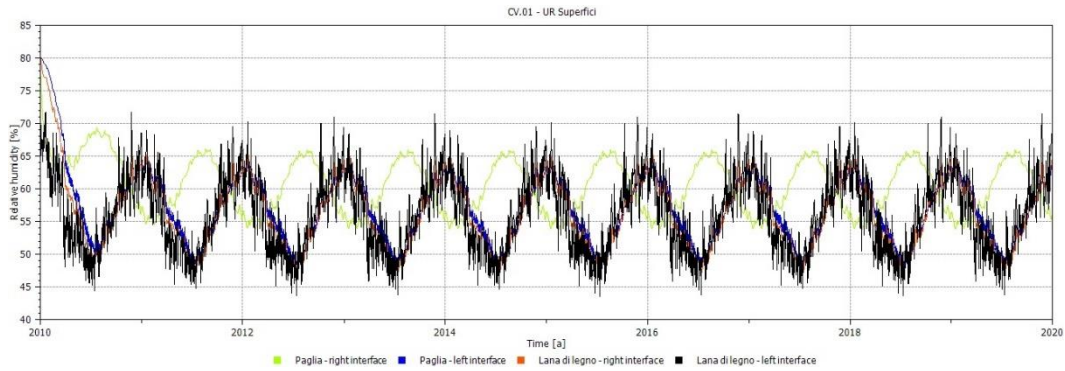
- Profilo di condensa



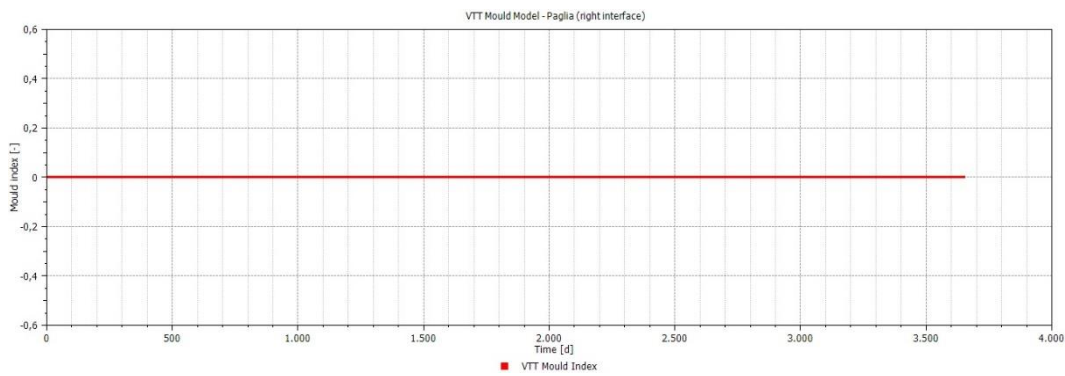
- Temperatura superfici



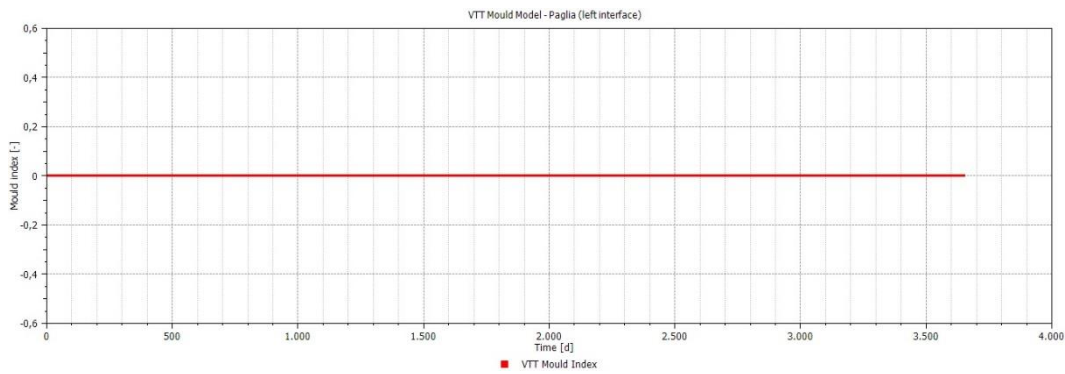
- Umidità Relativa superfici



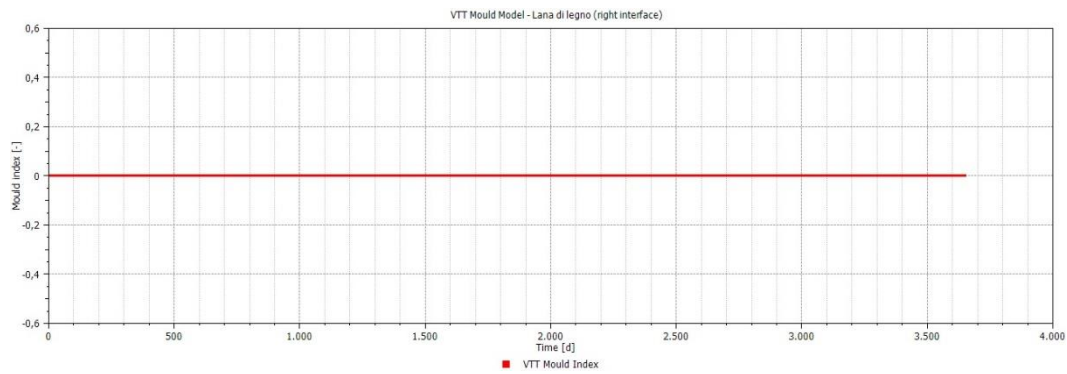
- VTT Mold Model (Paglia - Right Interface)



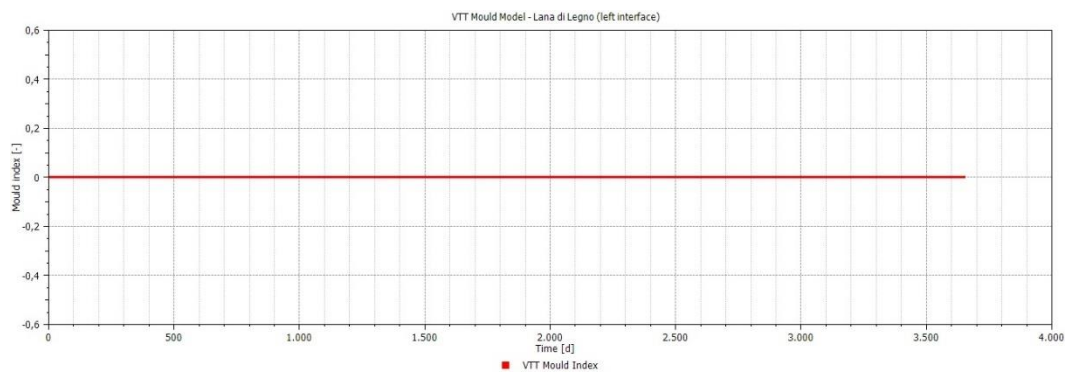
- VTT Mold Model (Paglia - Left Interface)



- VTT Mold Model (Lana di Legno - Right Interface)

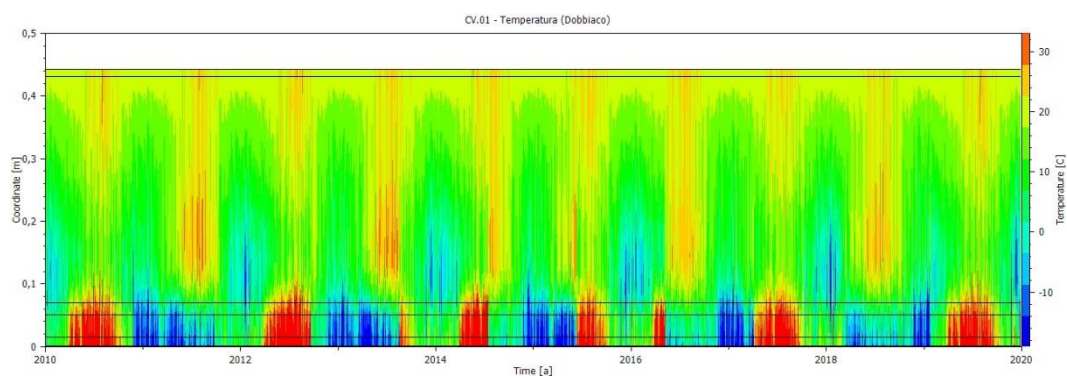


- VTT Mold Model (Lana di Legno - Left Interface)

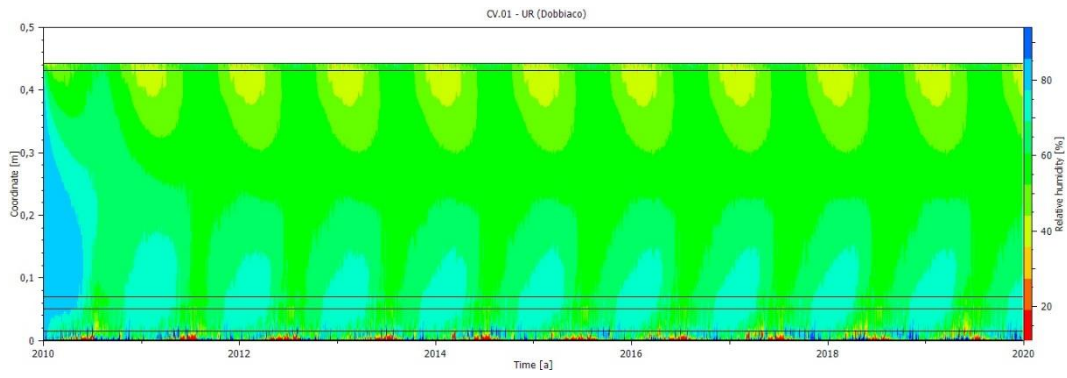


Stratigrafia chiusura verticale PABLOK Aperta (Dobbiaco)

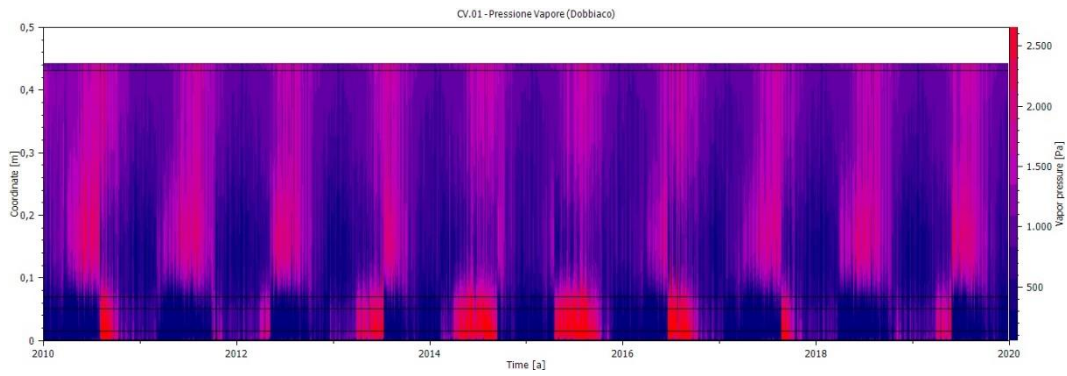
- Temperatura



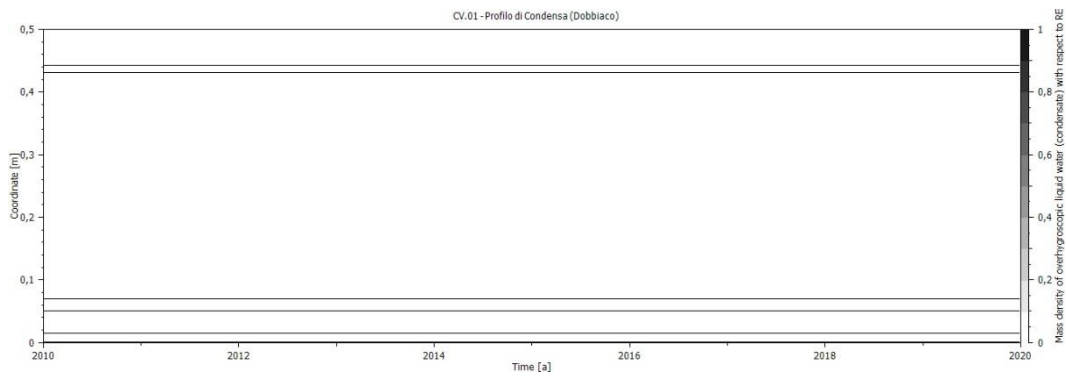
- Umidità Relativa



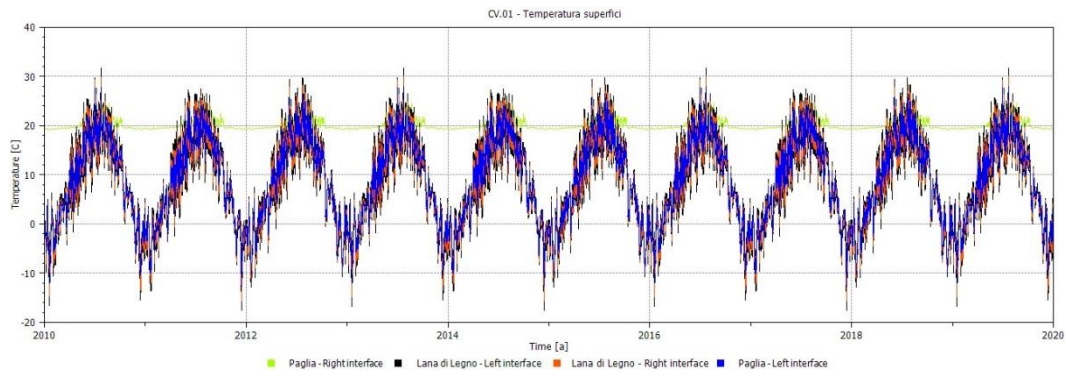
- Pressione di Vapore



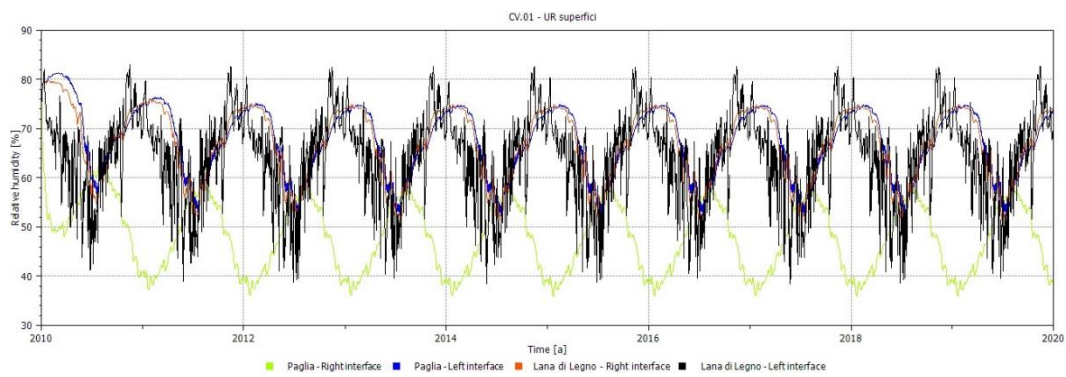
- Profilo di condensa



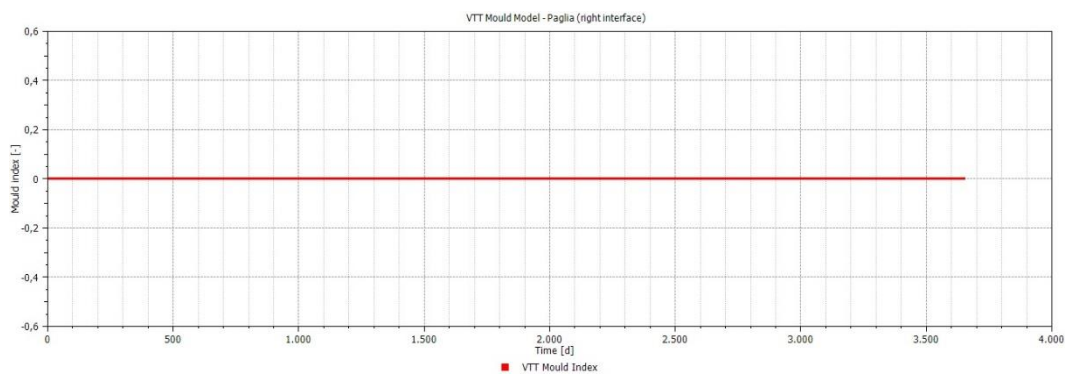
- Temperatura superfici



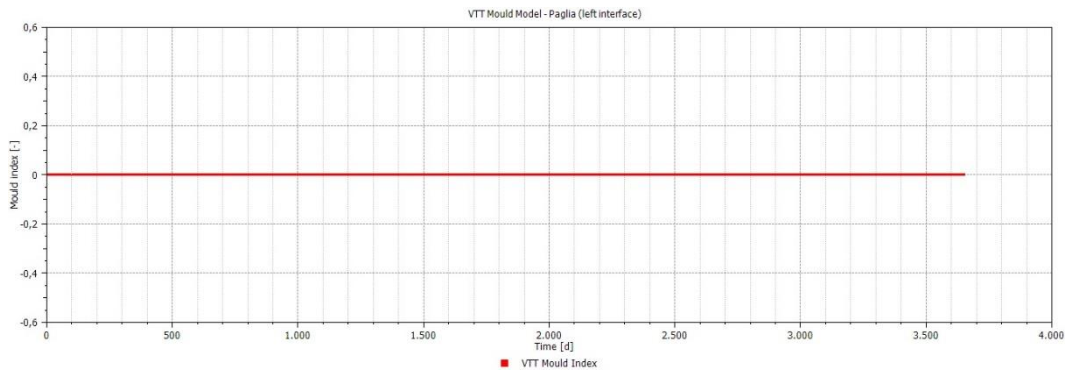
- Umidità Relativa superfici



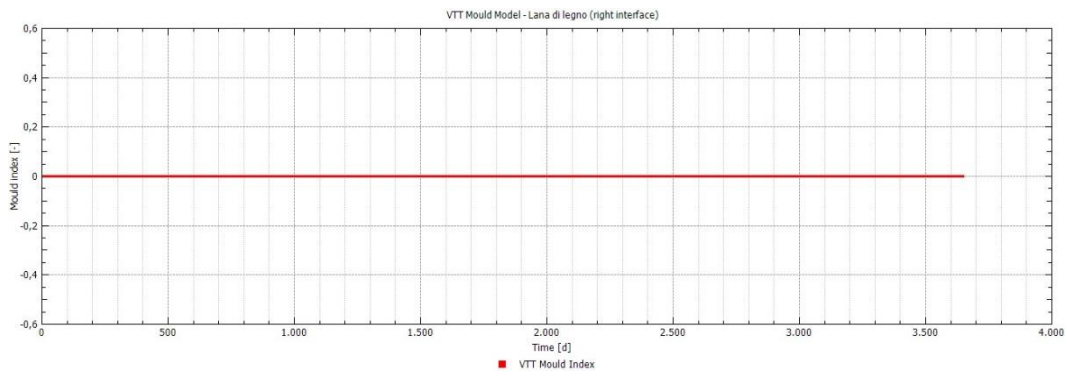
- VTT Mold Model (Paglia - Right Interface)



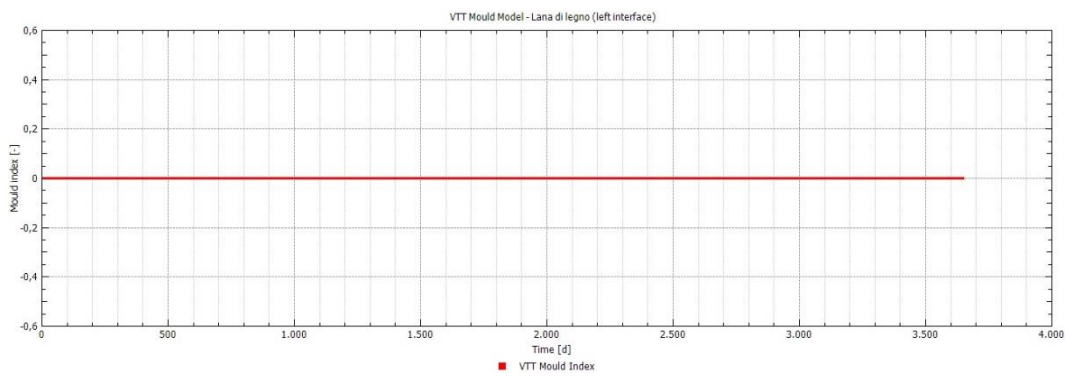
- VTT Mold Model (Paglia - Left Interface)



- VTT Mold Model (Lana di Legno - Right Interface)

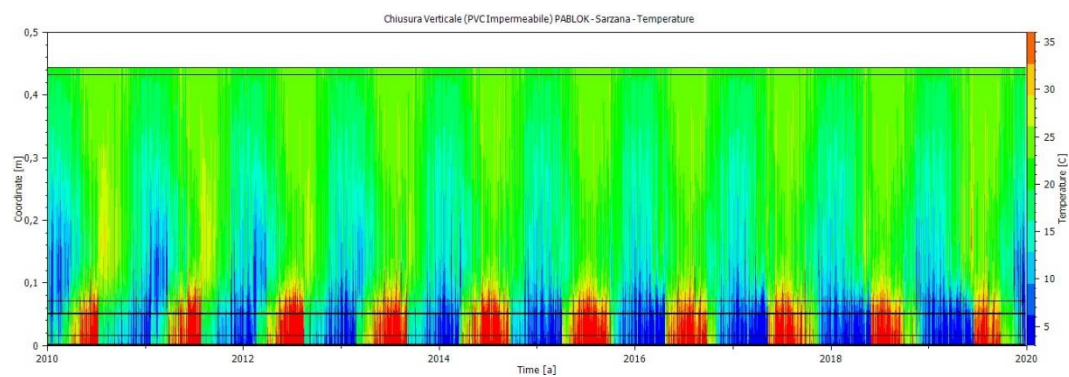


- VTT Mold Model (Lana di Legno - Left Interface)

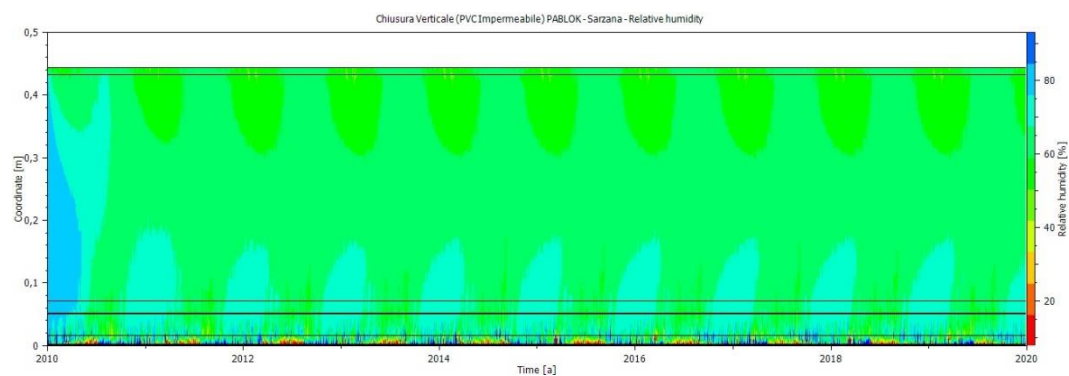


Stratigrafia chiusura verticale PABLOK a totale tenuta (Sarzana)

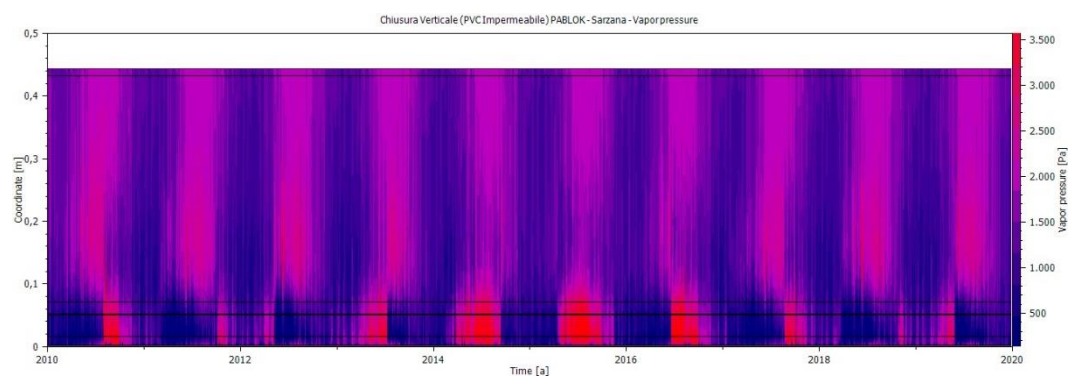
- Temperatura



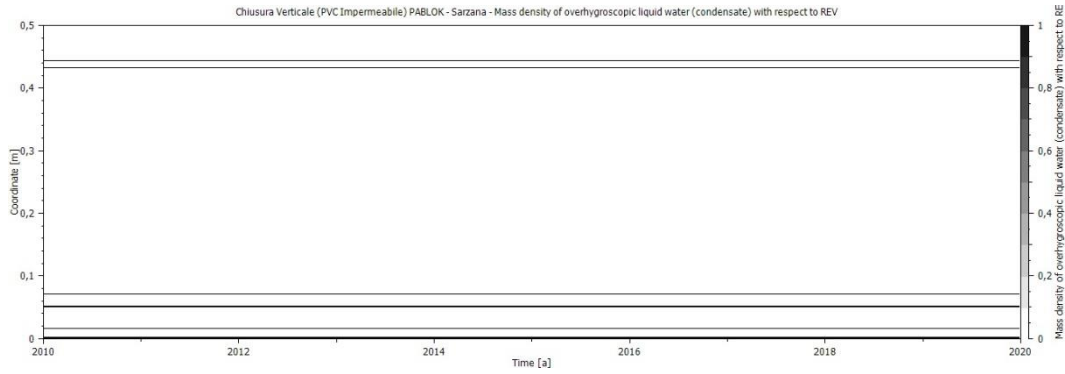
- Umidità Relativa



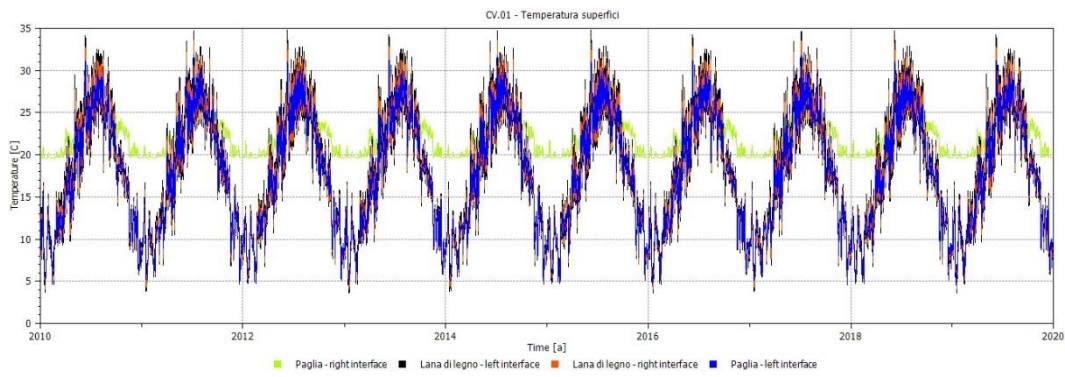
- Pressione di Vapore



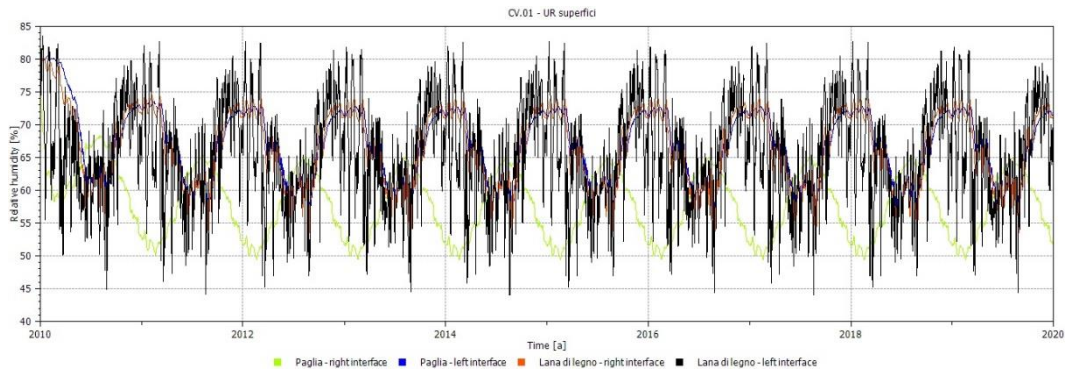
- Profilo di condensa



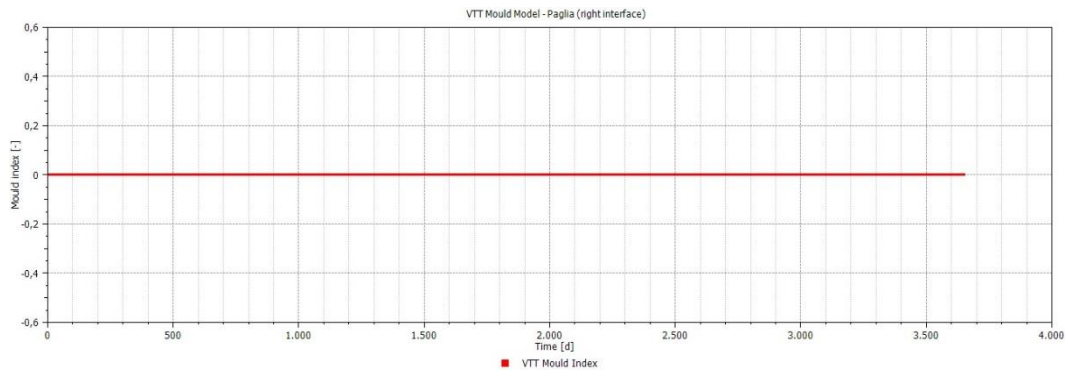
- Temperatura superfici



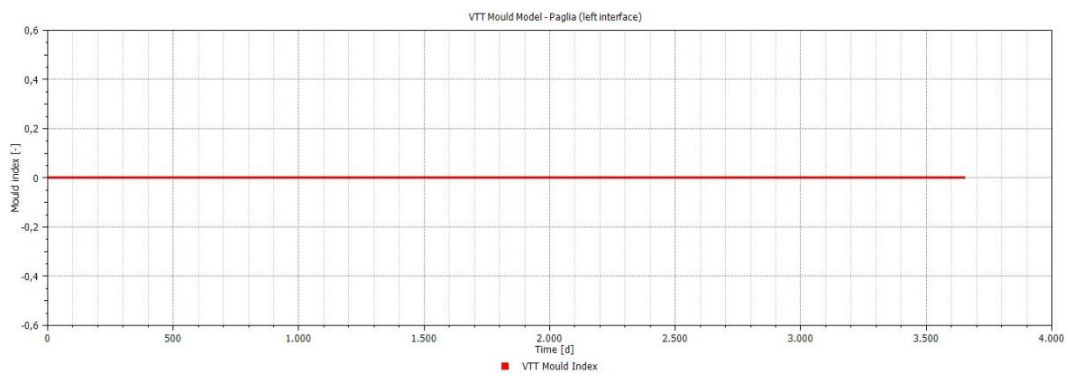
- Umidità Relativa superfici



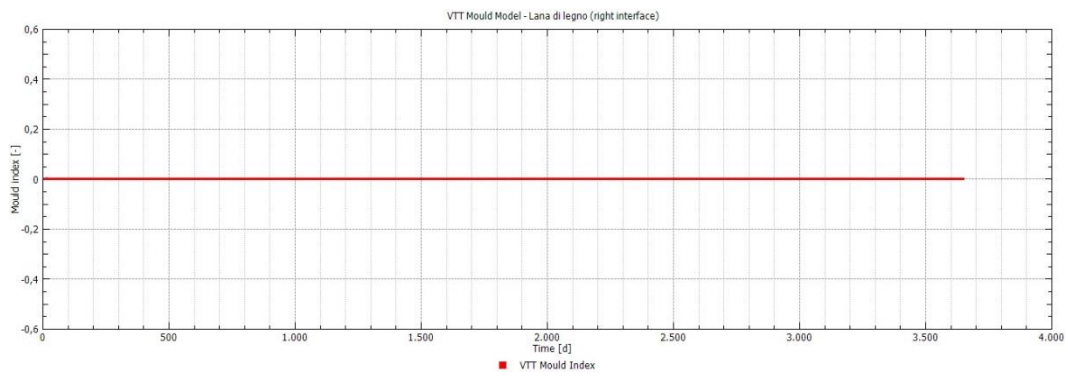
- VTT Mold Model (Paglia - Right Interface)



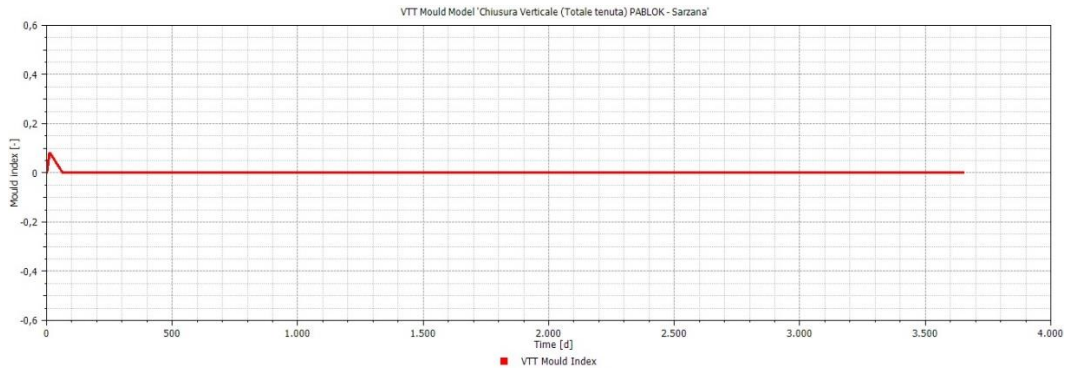
- VTT Mold Model (Paglia - Left Interface)



- VTT Mold Model (Lana di Legno - Right Interface)

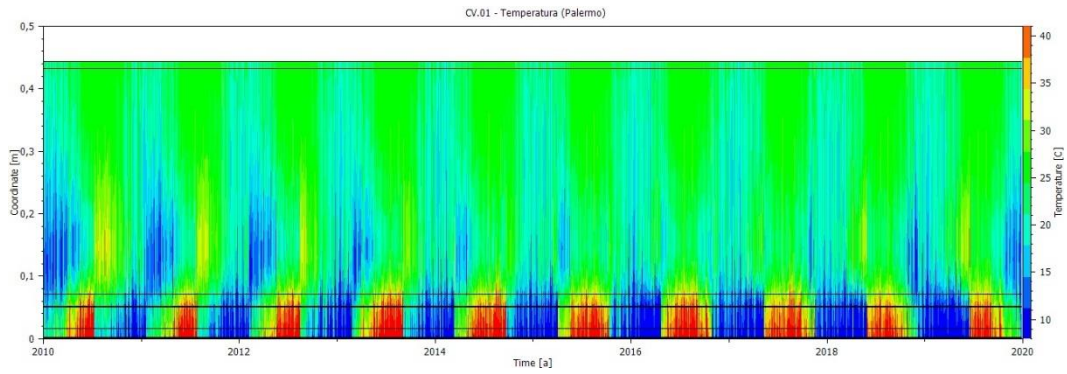


- VTT Mold Model (Lana di Legno - Left Interface)

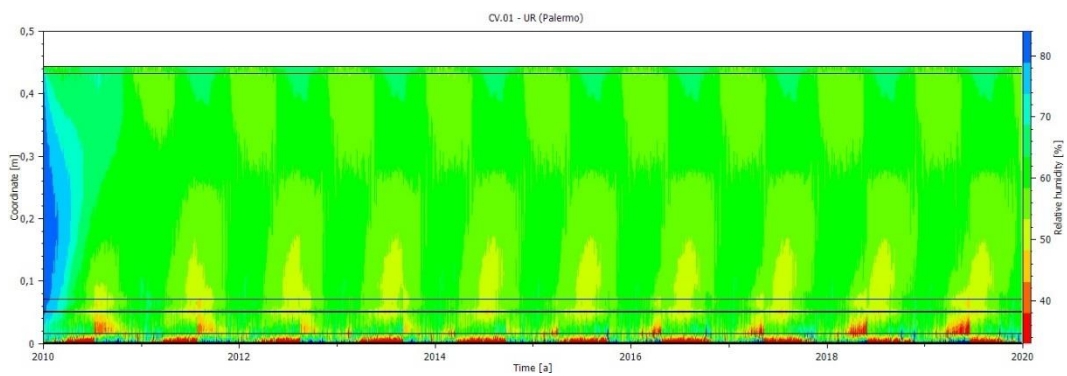


Stratigrafia chiusura verticale PABLOK a totale tenuta (Palermo)

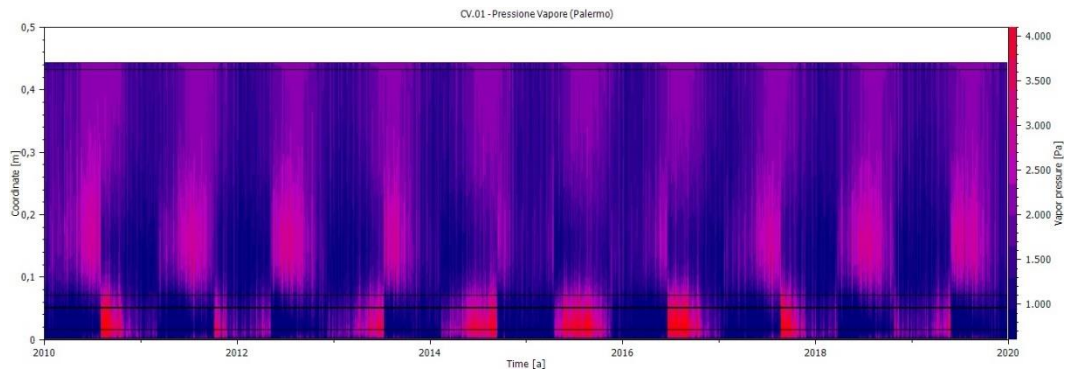
- Temperatura



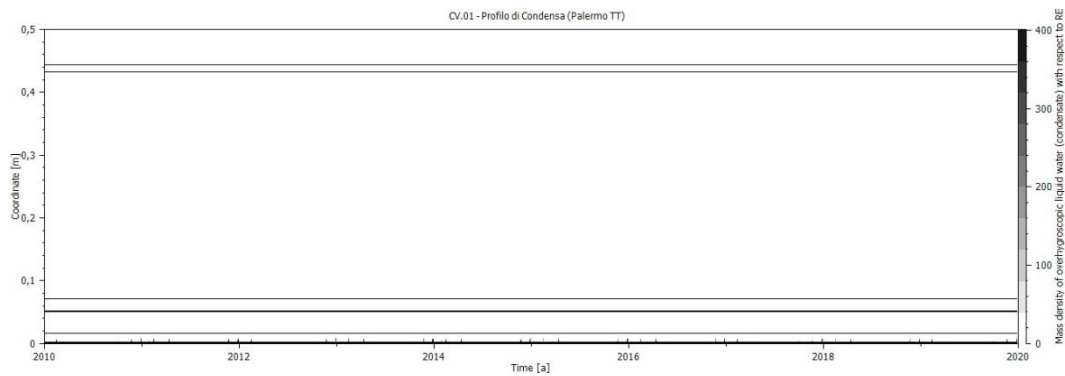
- Umidità Relativa



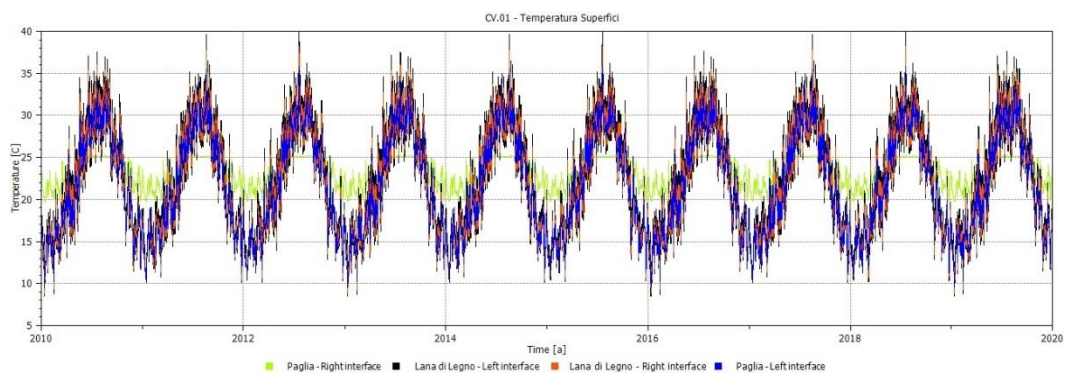
- Pressione di Vapore



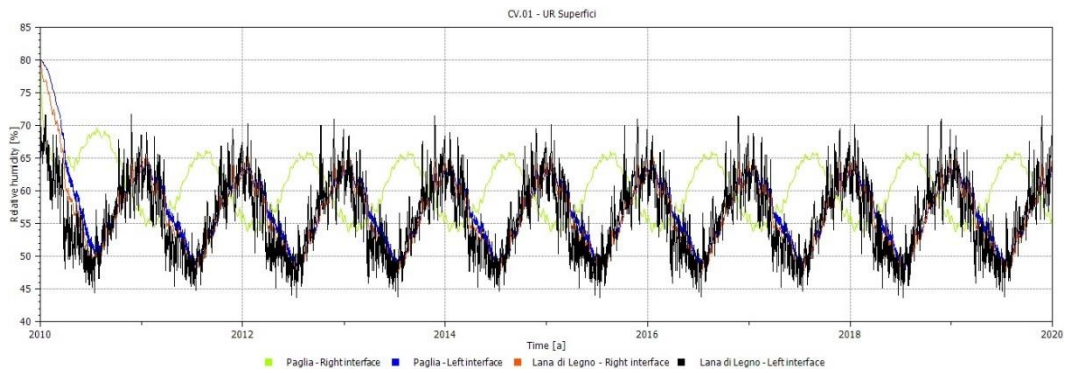
- Profilo di condensa



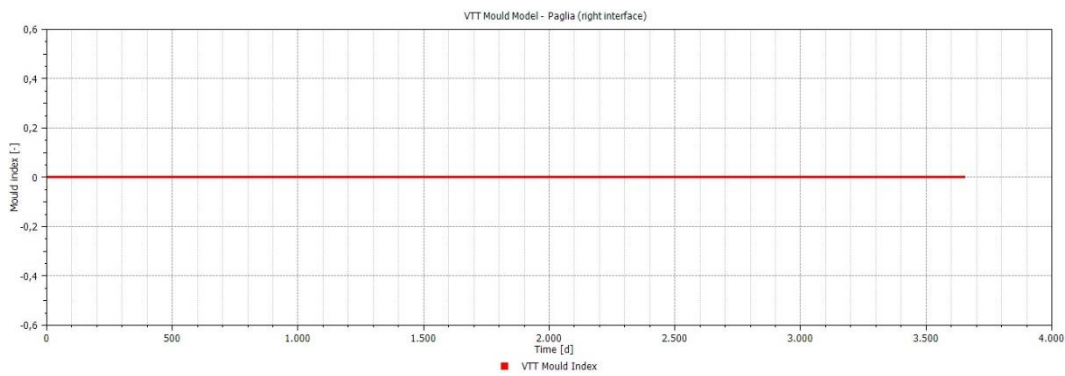
- Temperatura superfici



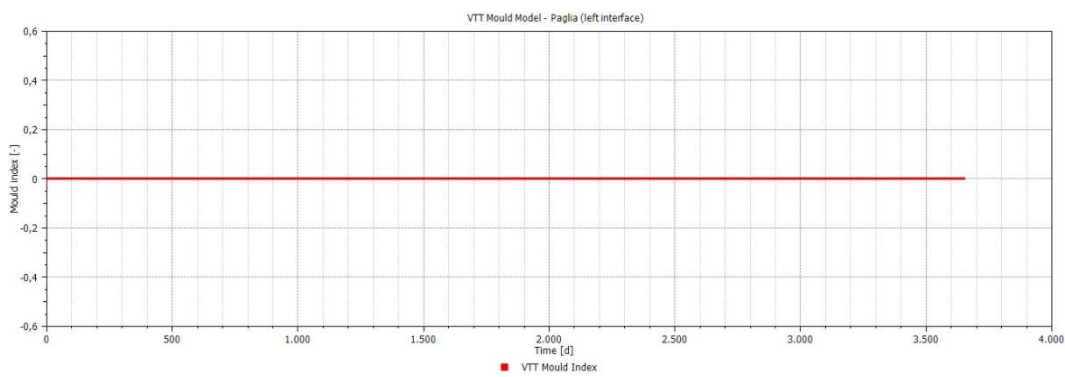
- Umidità Relativa superfici



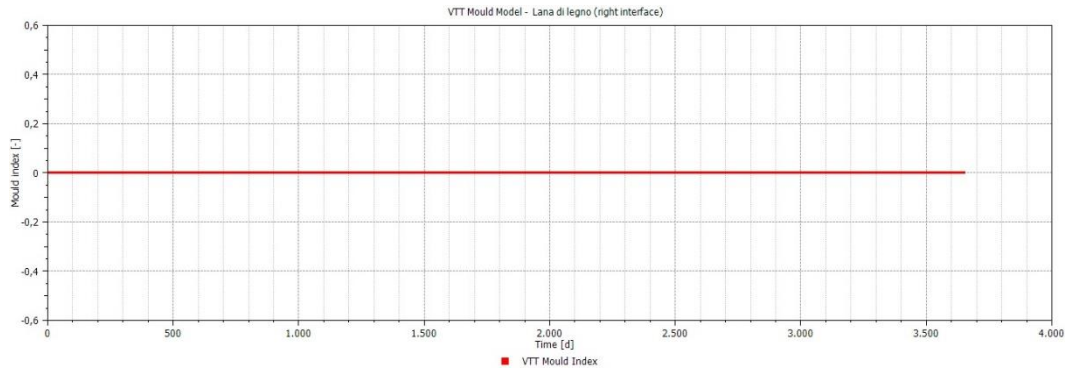
- VTT Mold Model (Paglia - Right Interface)



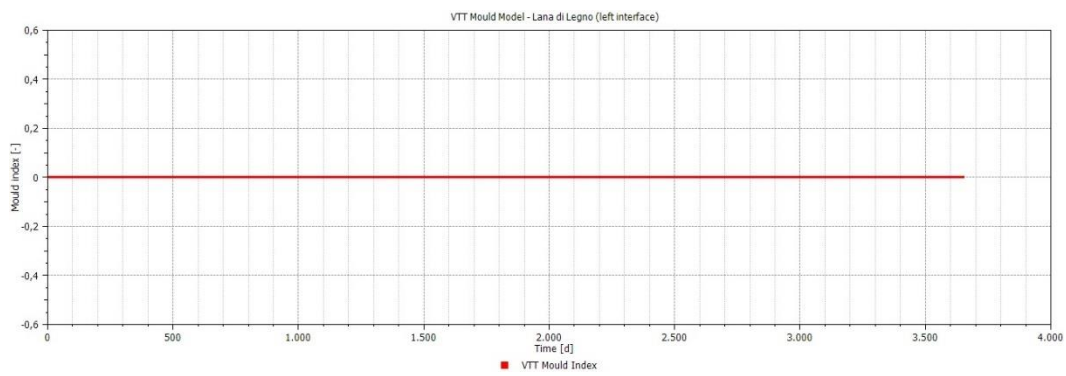
- VTT Mold Model (Paglia - Left Interface)



- VTT Mold Model (Lana di Legno - Right Interface)

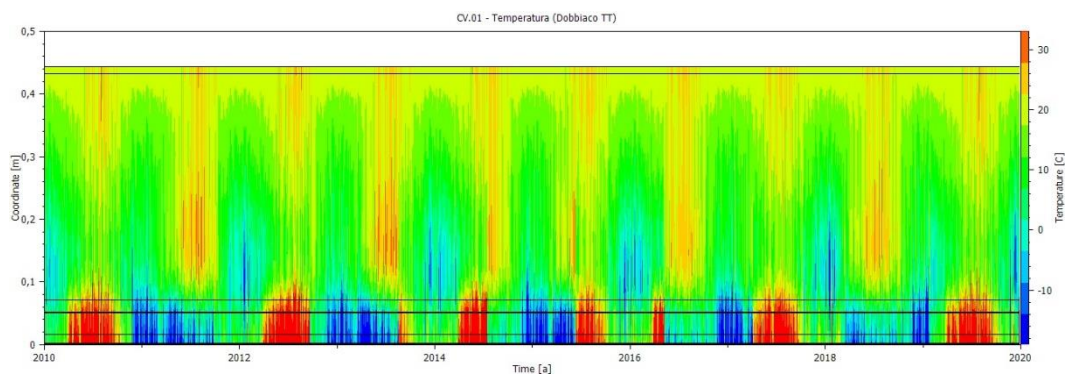


- VTT Mold Model (Lana di Legno - Left Interface)

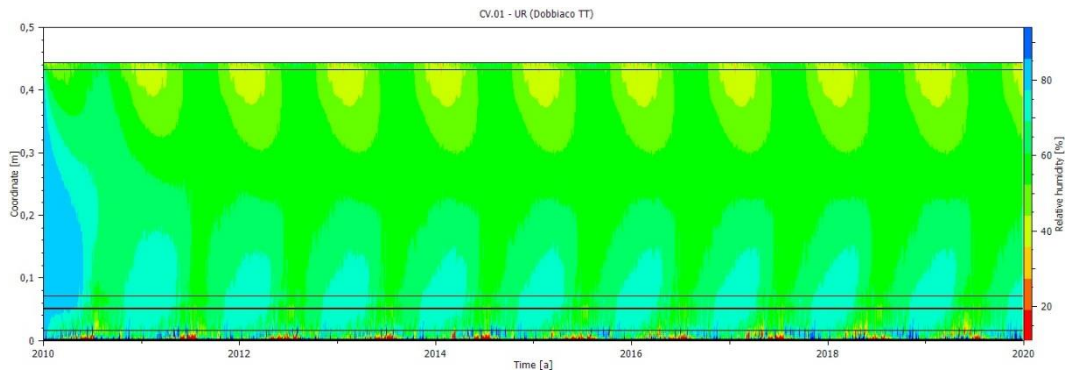


Stratigrafia chiusura verticale PABLOK a totale tenuta (Dobbiaco)

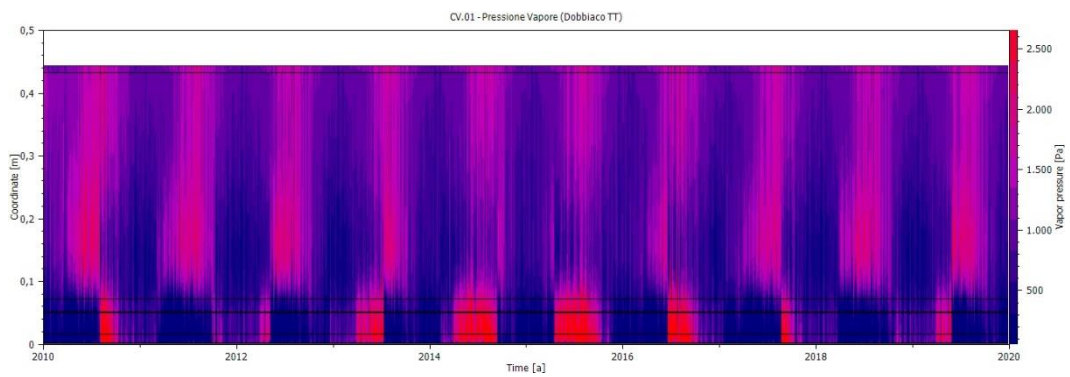
- Temperatura



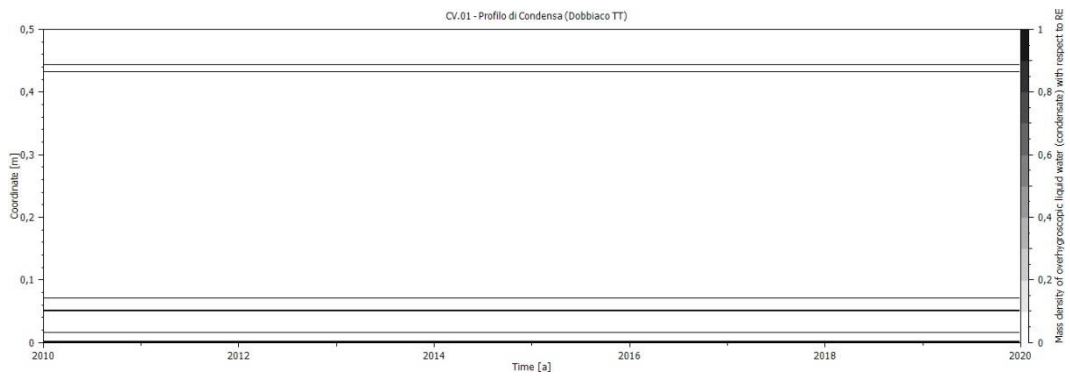
- Umidità Relativa



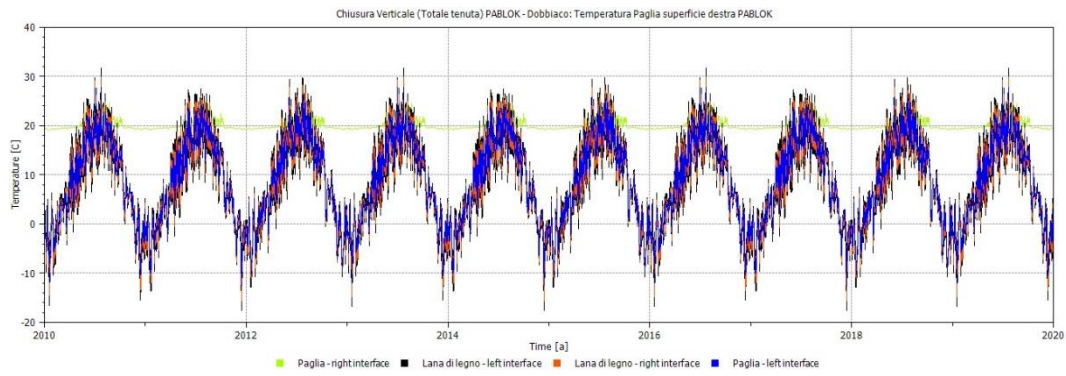
- Pressione di Vapore



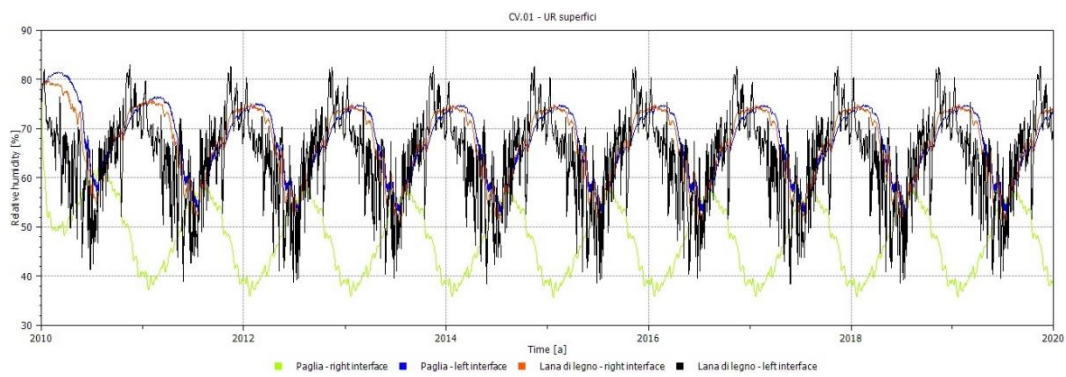
- Profilo di condensa



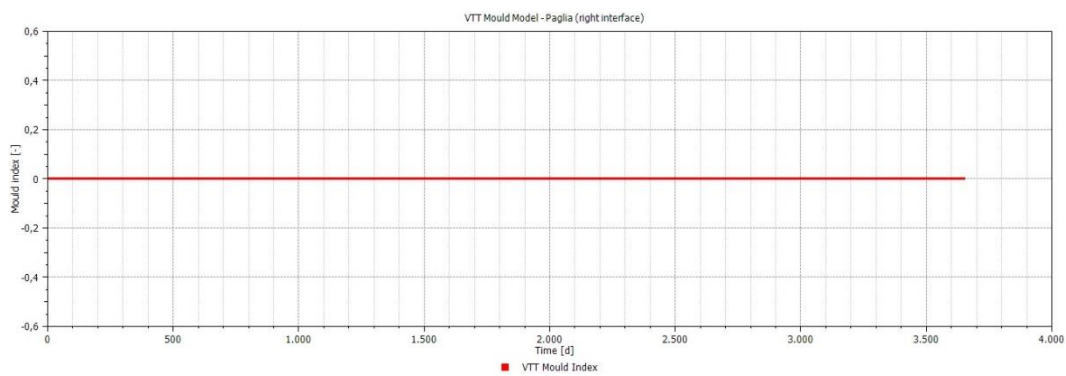
- Temperatura superfici



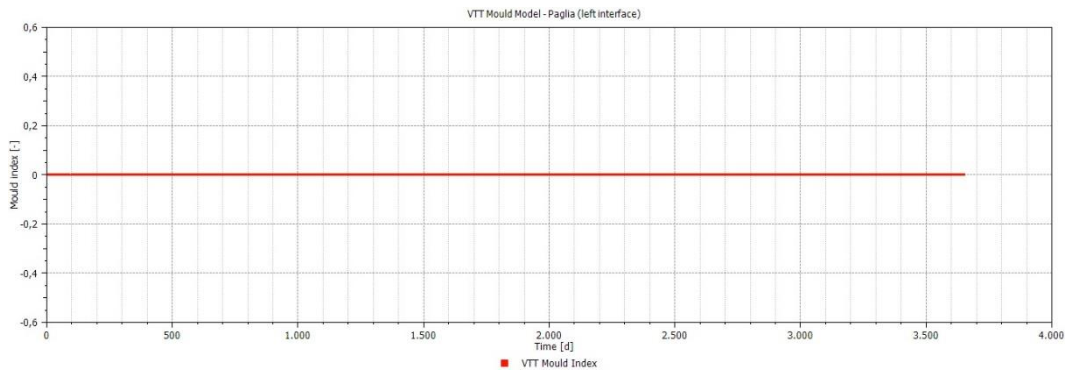
- Umidità Relativa superfici



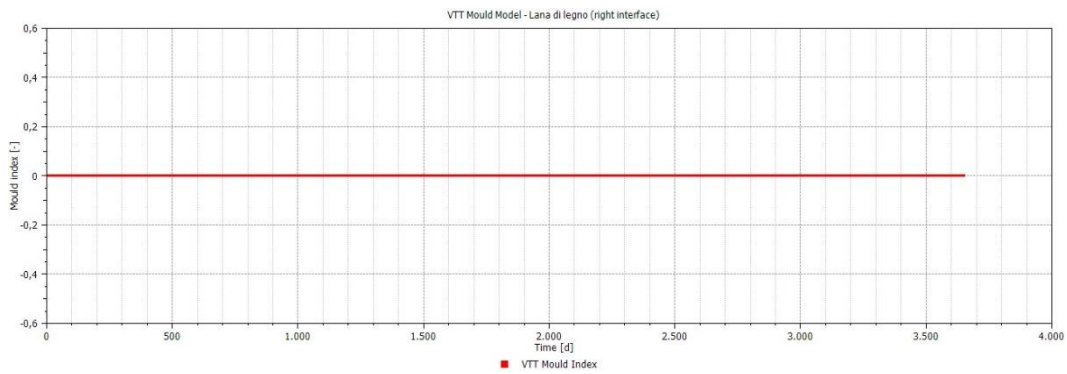
- VTT Mold Model (Paglia - Right Interface)



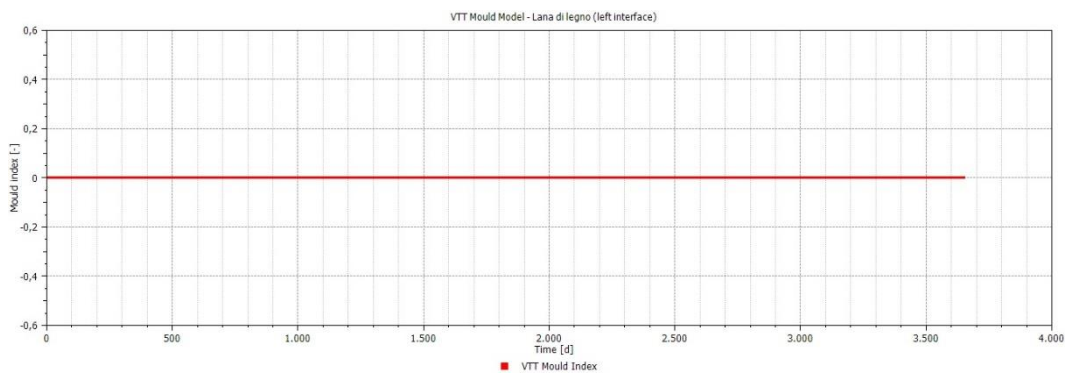
- VTT Mold Model (Paglia - Left Interface)



- VTT Mold Model (Lana di Legno - Right Interface)



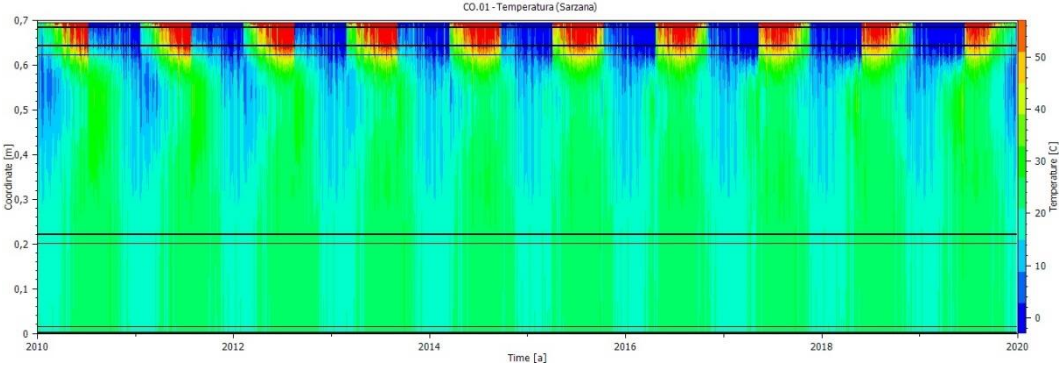
- VTT Mold Model (Lana di Legno - Left Interface)



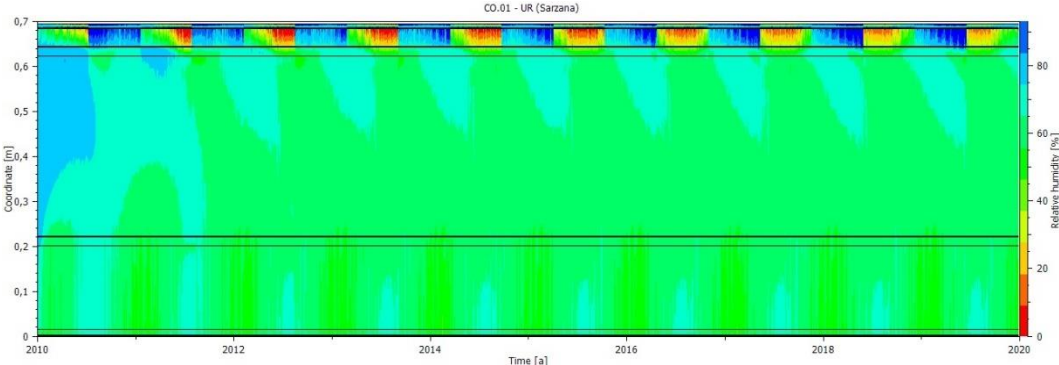
COPERTURA

Stratigrafia copertura PABLOK (Sarzana)

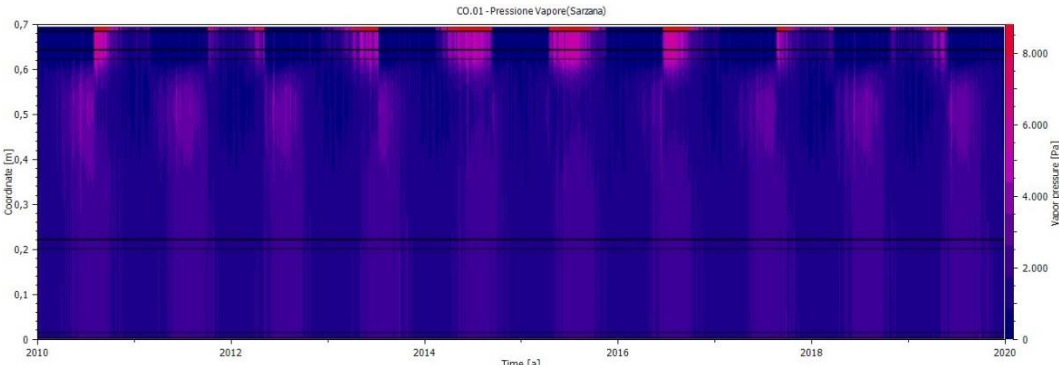
- Temperatura



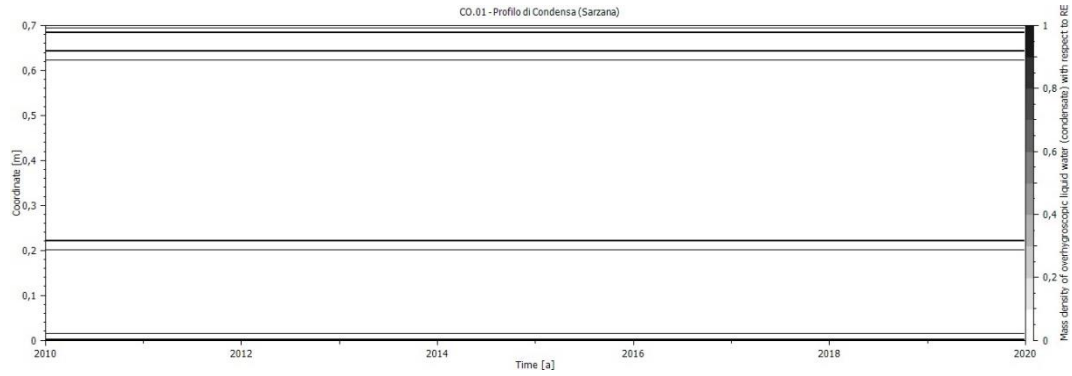
- Umidità Relativa



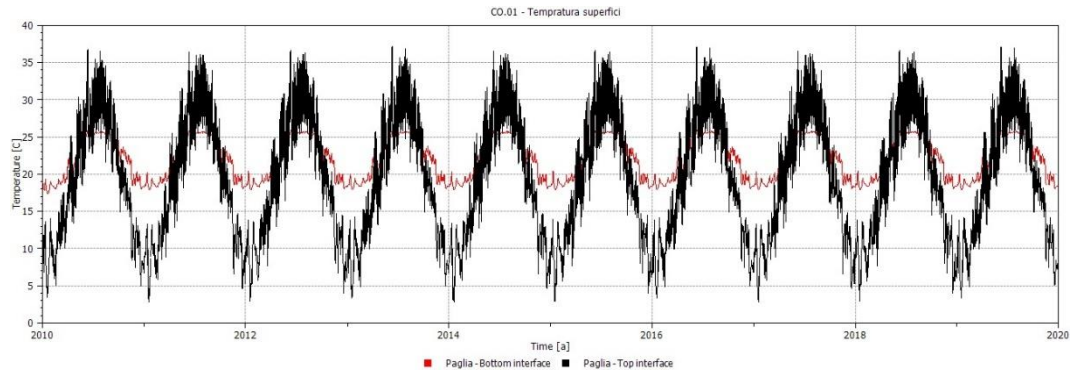
- Pressione di Vapore



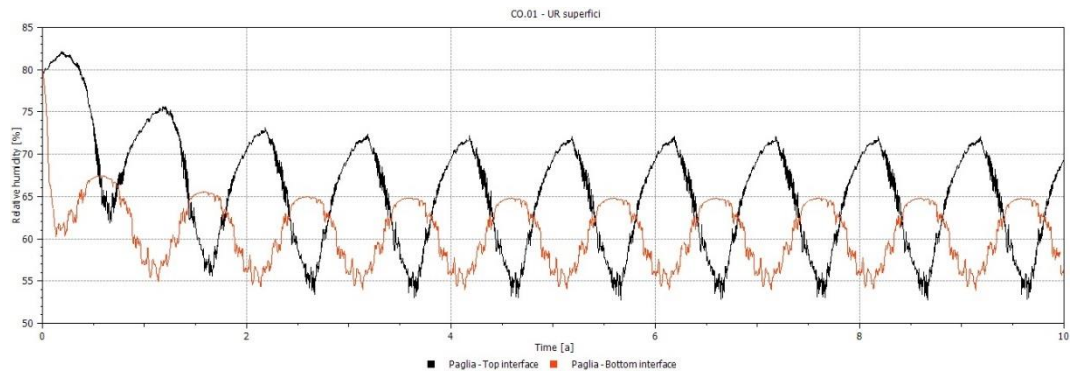
- Profilo di condensa



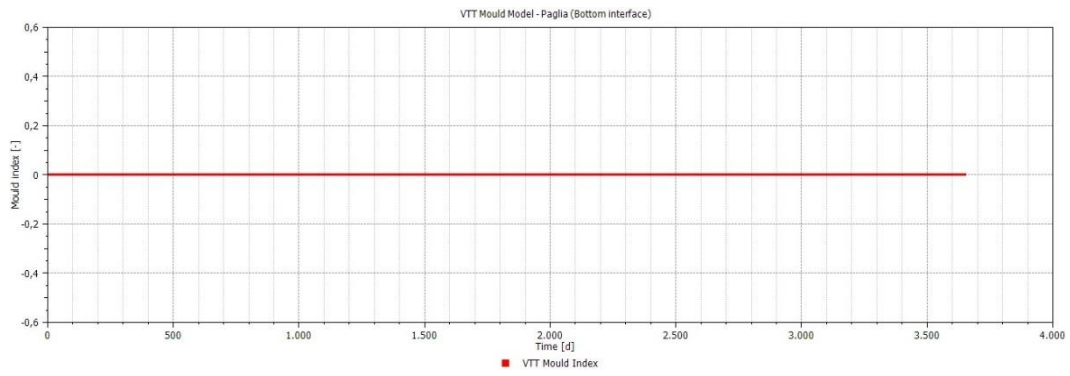
- Temperatura superfici



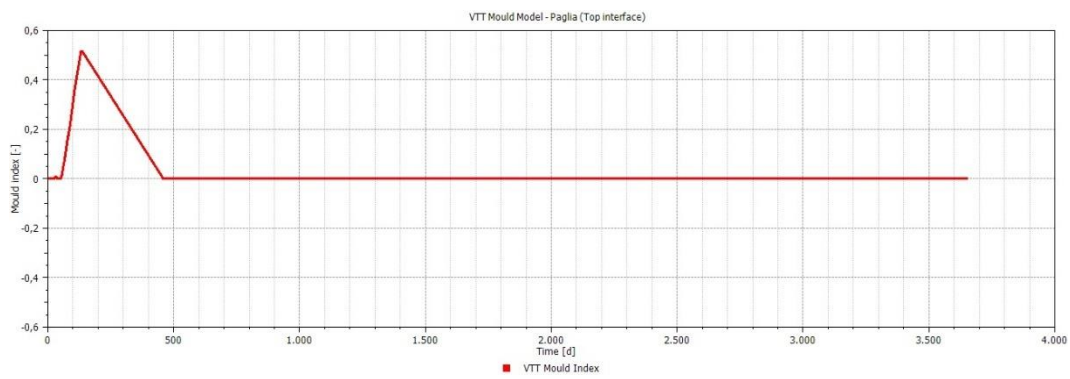
- Umidità Relativa superfici



- VTT Mold Model (Paglia - Bottom Interface)

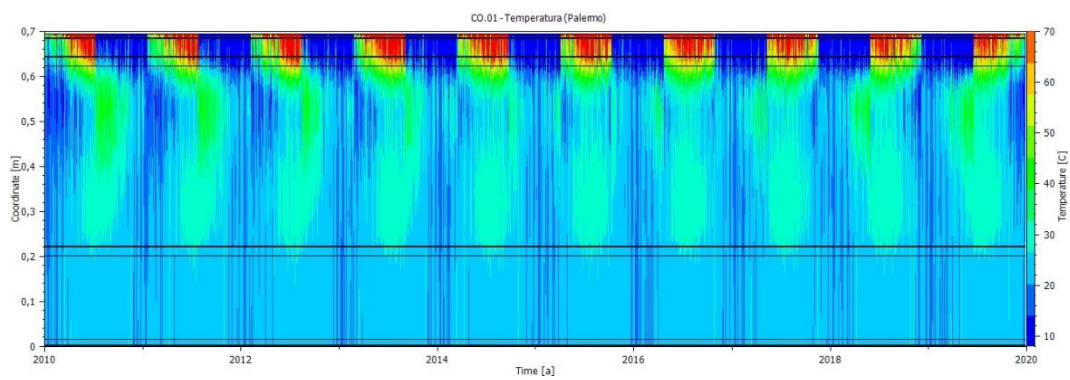


- VTT Mold Model (Paglia - Top Interface)

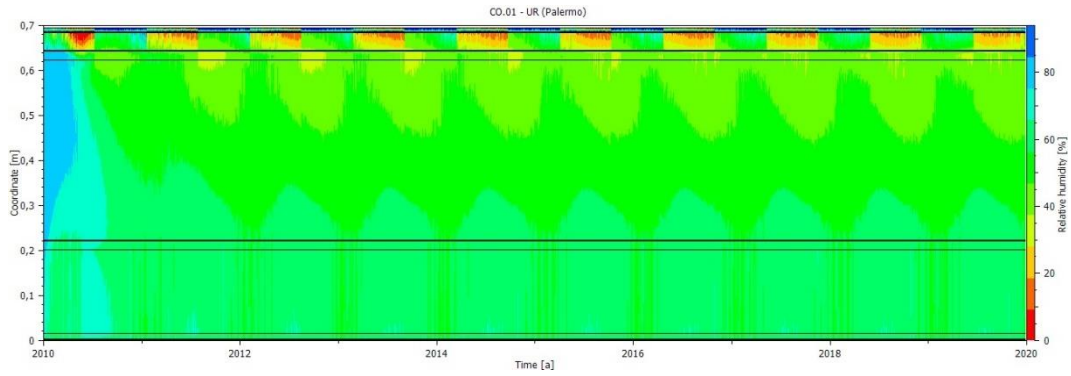


Stratigrafia copertura PABLOK (Palermo)

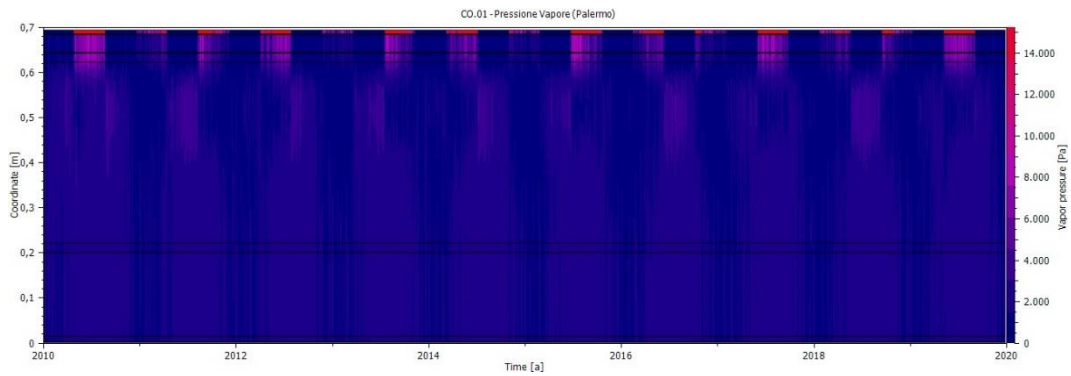
- Temperatura



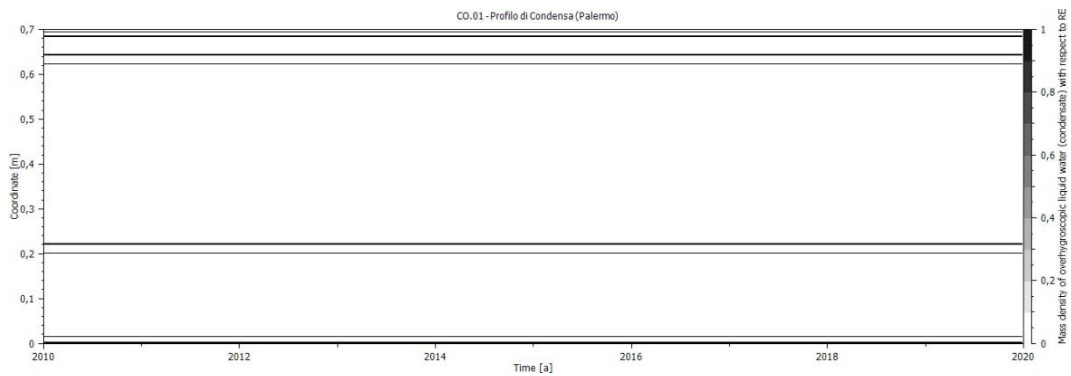
- Umidità Relativa



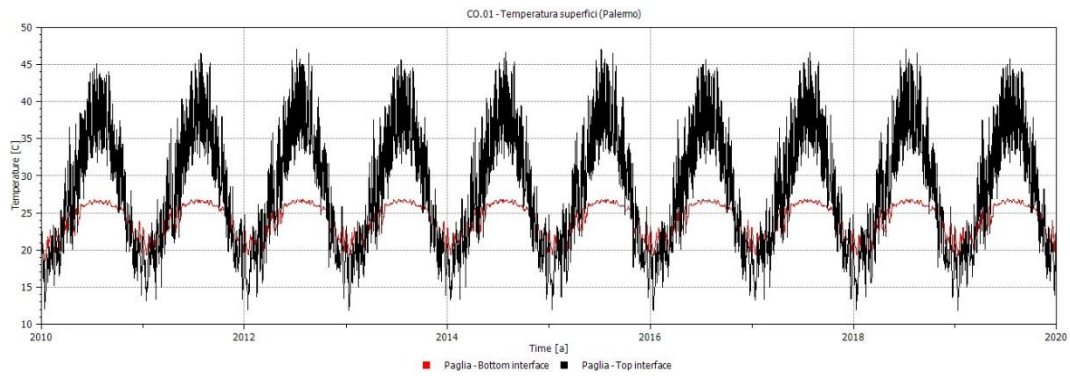
- Pressione di Vapore



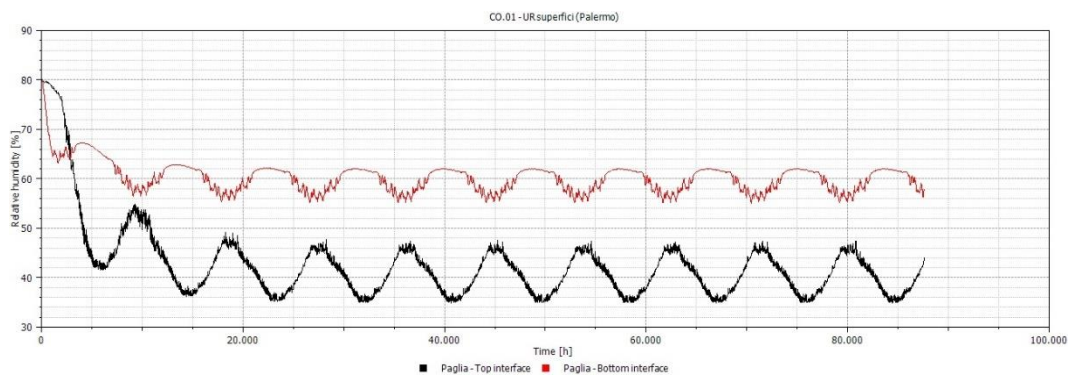
- Profilo di condensa



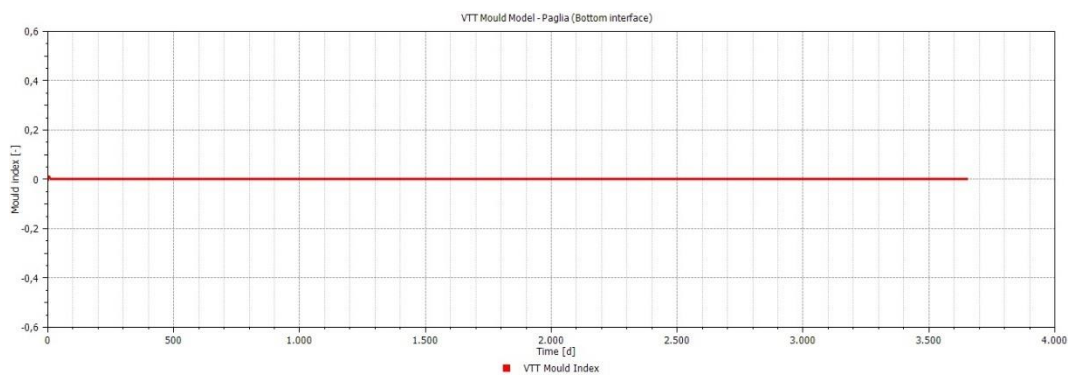
- Temperatura superfici



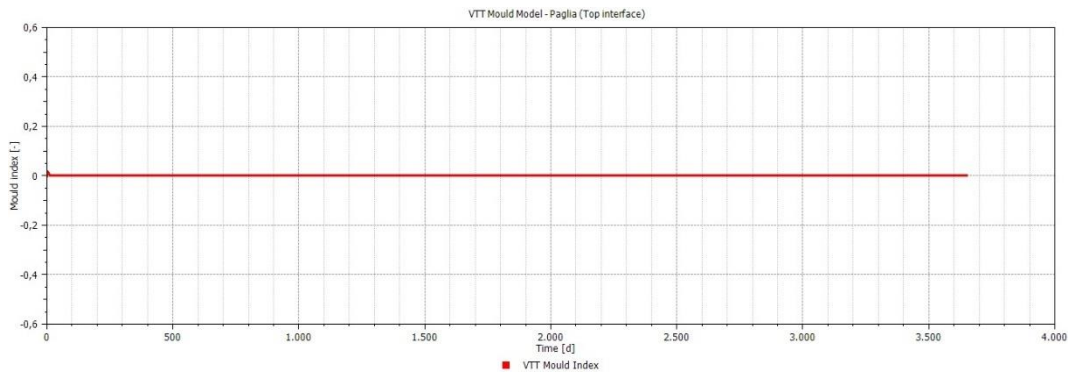
- Umidità Relativa superfici



- VTT Mold Model (Paglia - Bottom Interface)

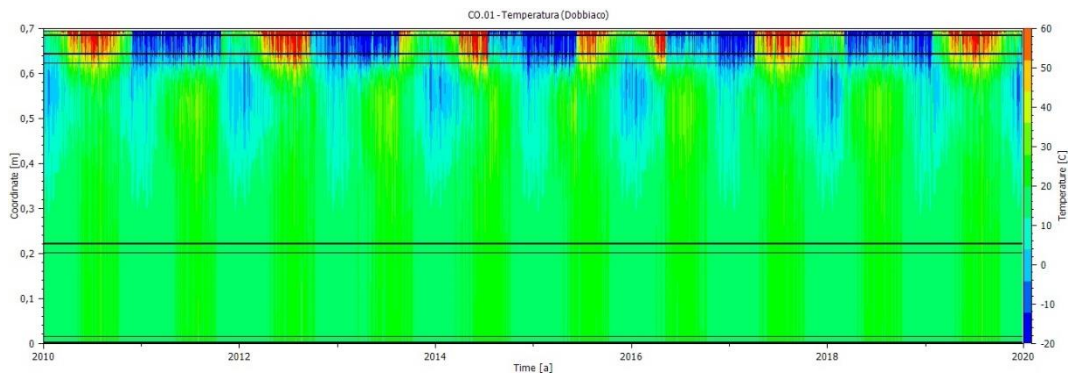


- VTT Mold Model (Paglia - Top Interface)

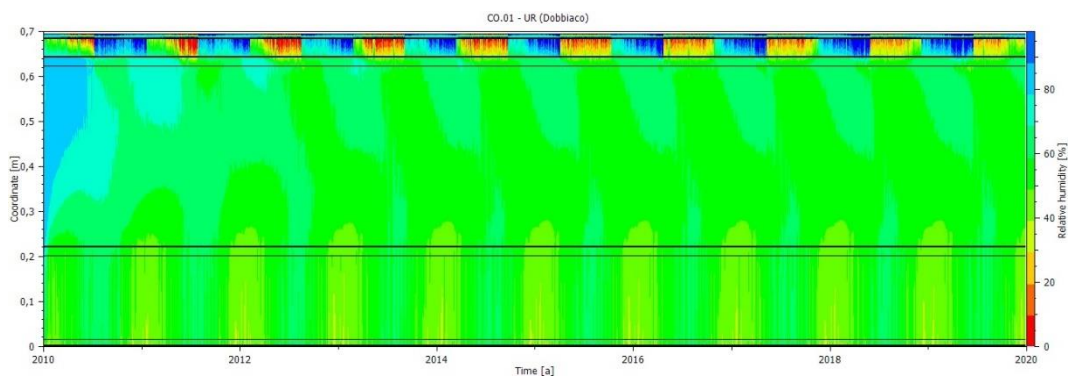


Stratigrafia copertura PABLOK (Dobbiaco)

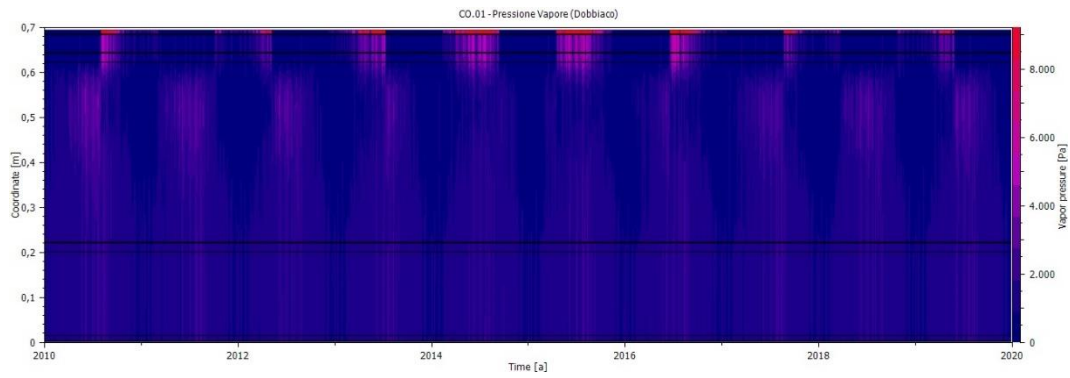
- Temperatura



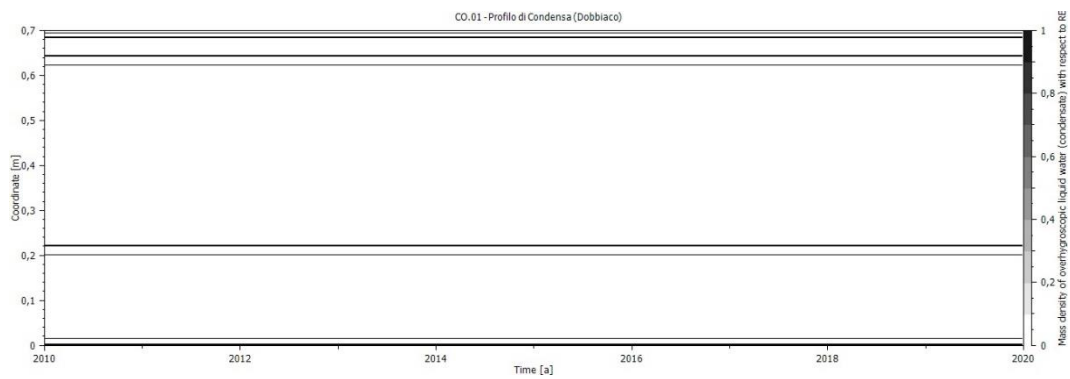
- Umidità Relativa



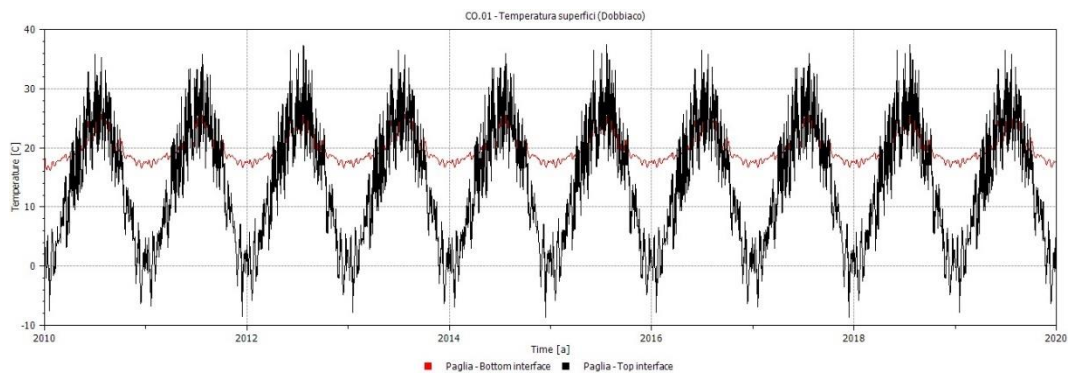
- Pressione di Vapore



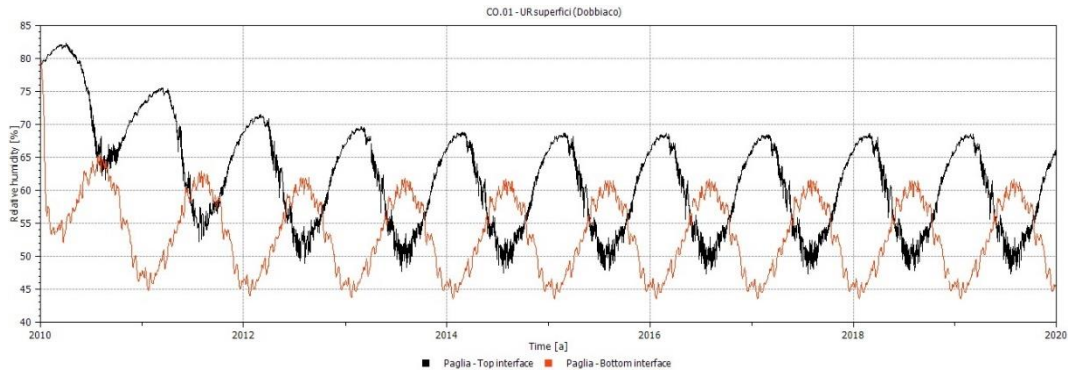
- Profilo di condensa



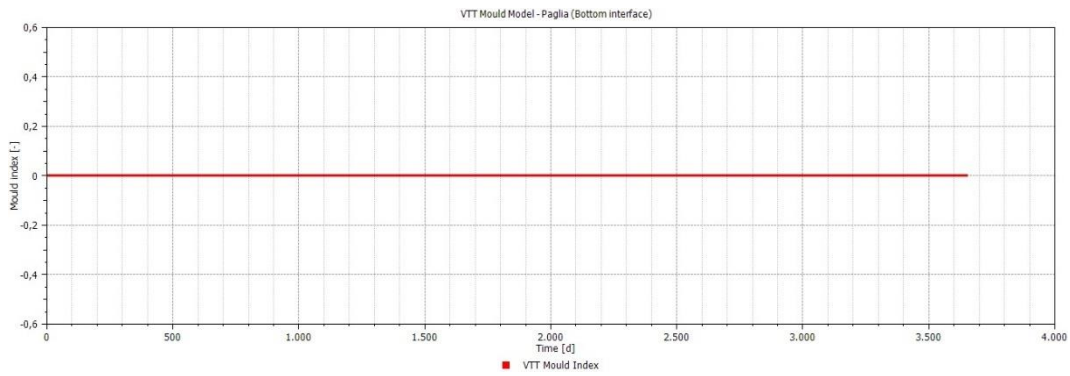
- Temperatura superfici



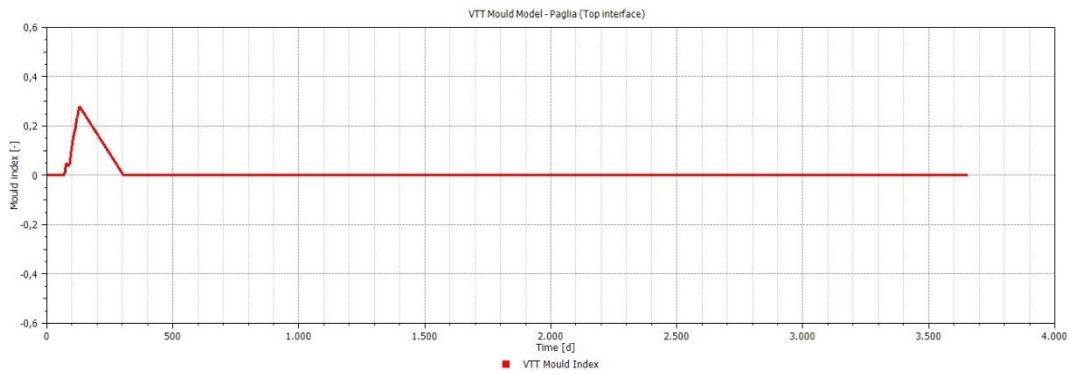
- Umidità Relativa superfici



- VTT Mold Model (Paglia - Bottom Interface)

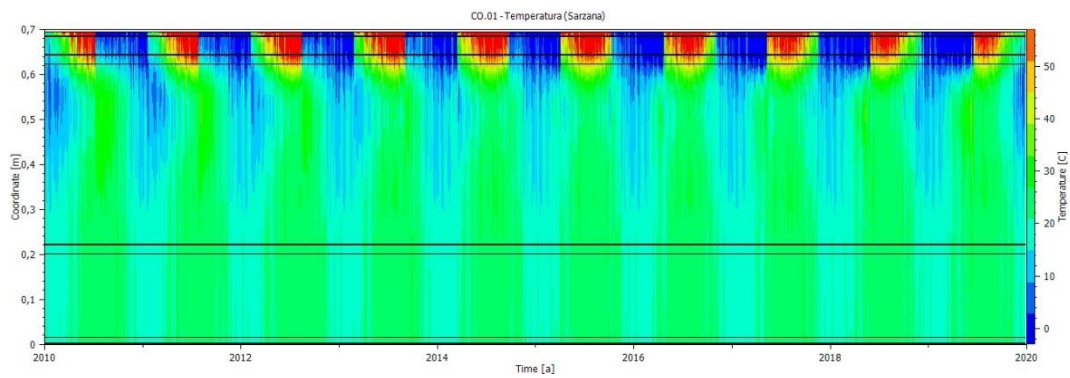


- VTT Mold Model (Paglia - Top Interface)

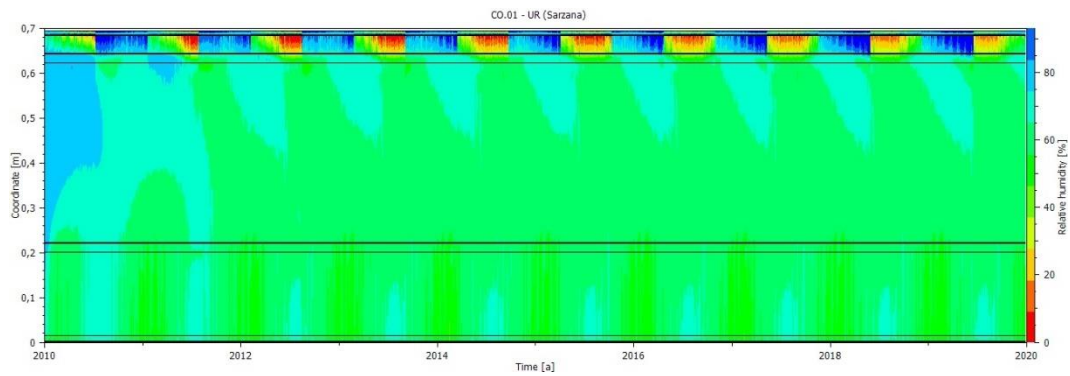


Stratigrafia copertura PABLOK Aperta (Sarzana)

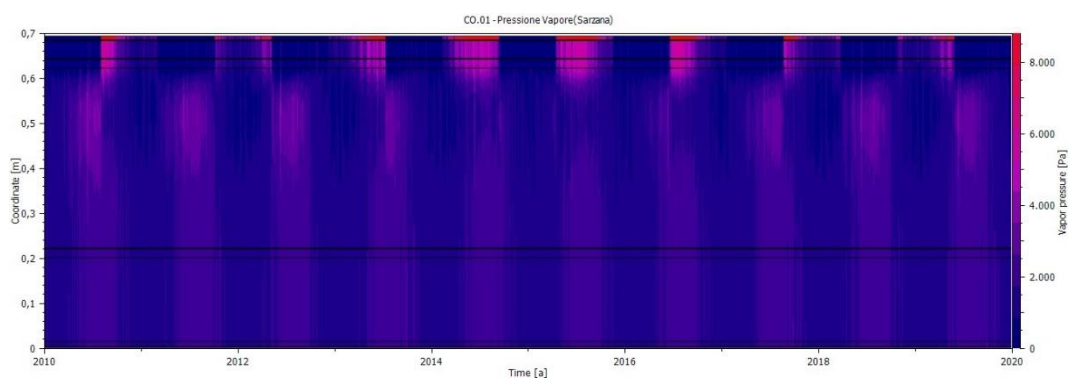
- Temperatura



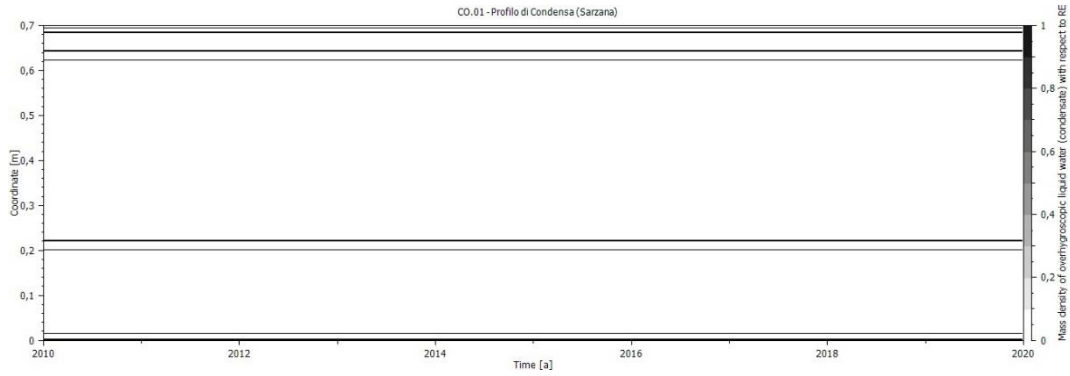
- Umidità Relativa



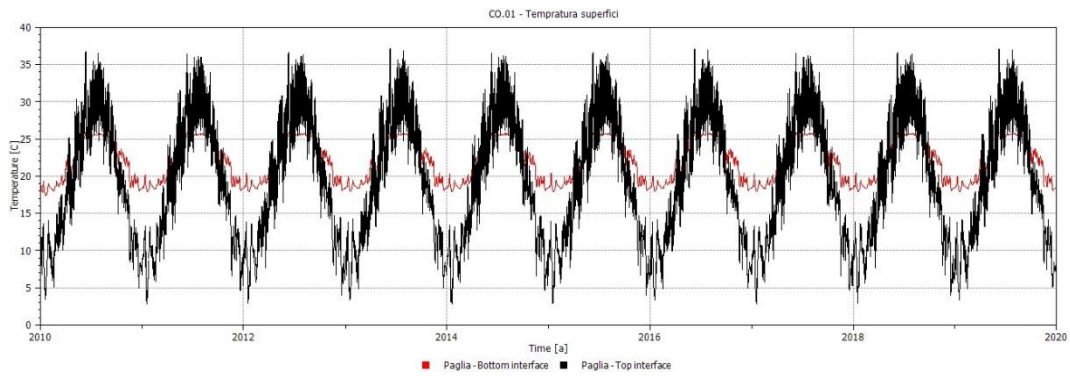
- Pressione di Vapore



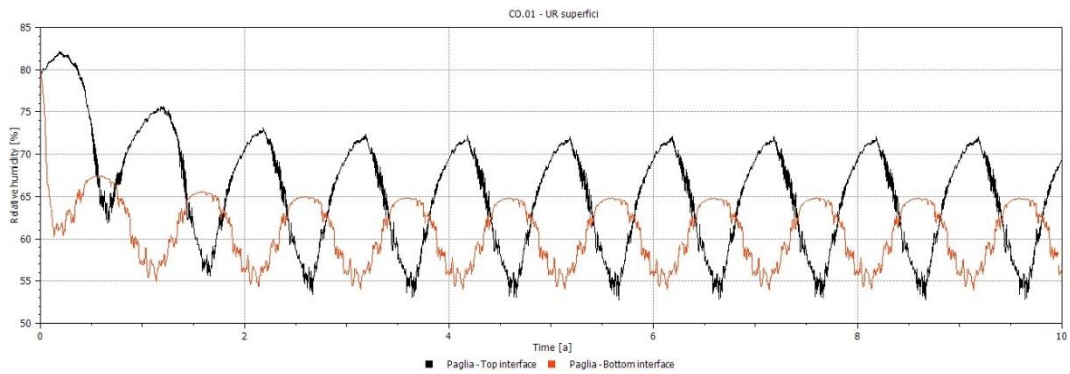
- Profilo di condensa



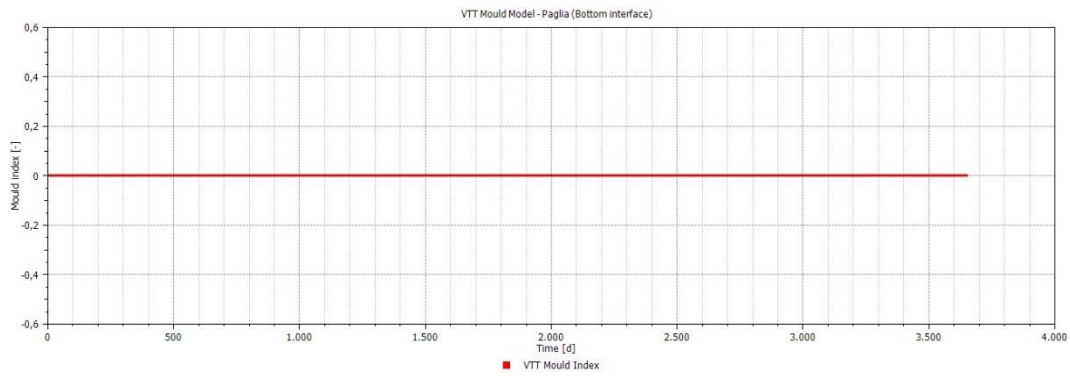
- Temperatura superfici



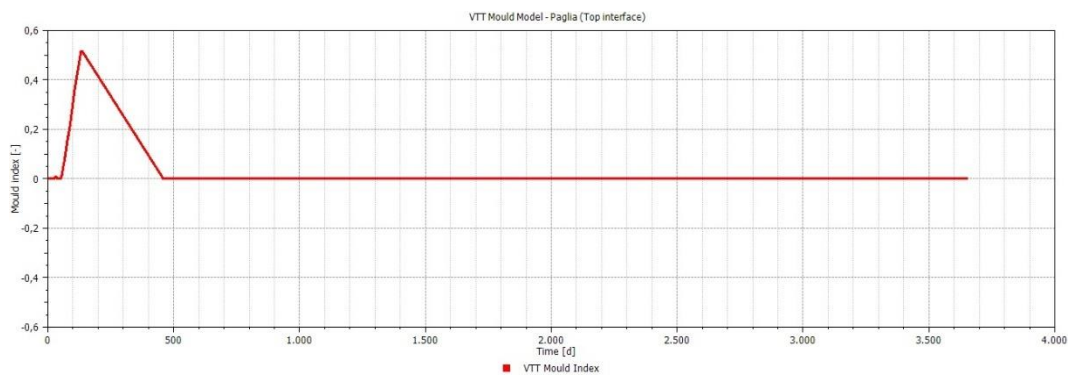
- Umidità Relativa superfici



- VTT Mold Model (Paglia - Bottom Interface)

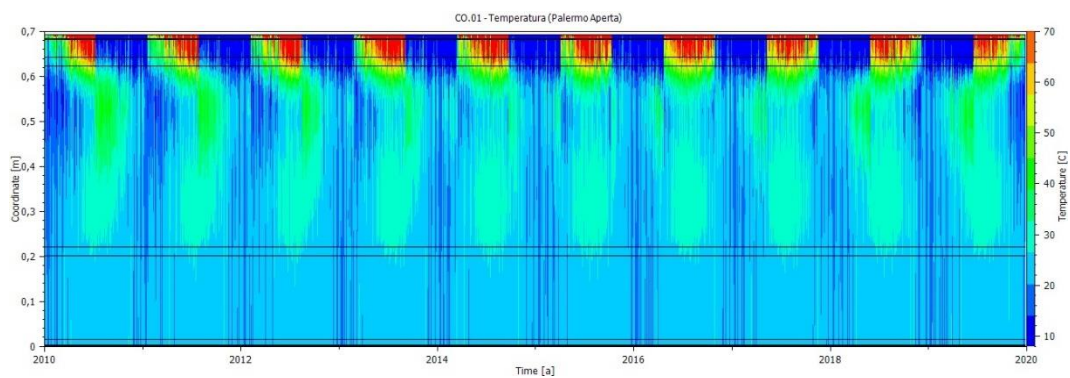


- VTT Mold Model (Paglia - Top Interface)

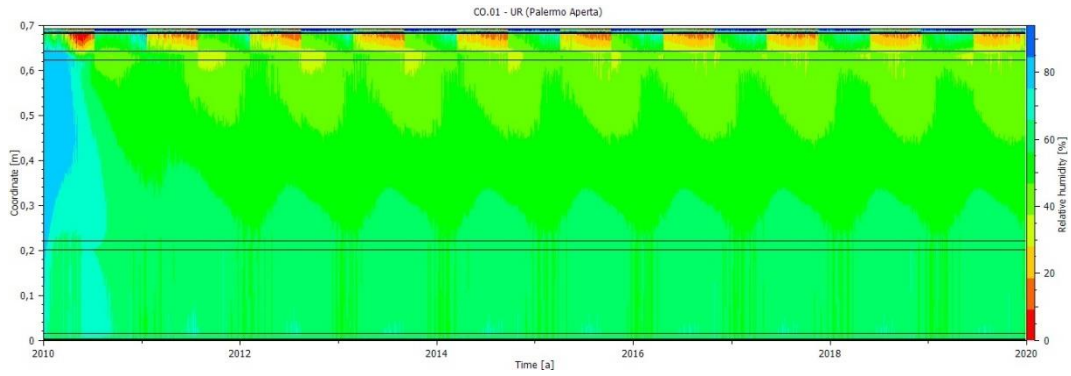


Stratigrafia copertura PABLOK Aperta (Palermo)

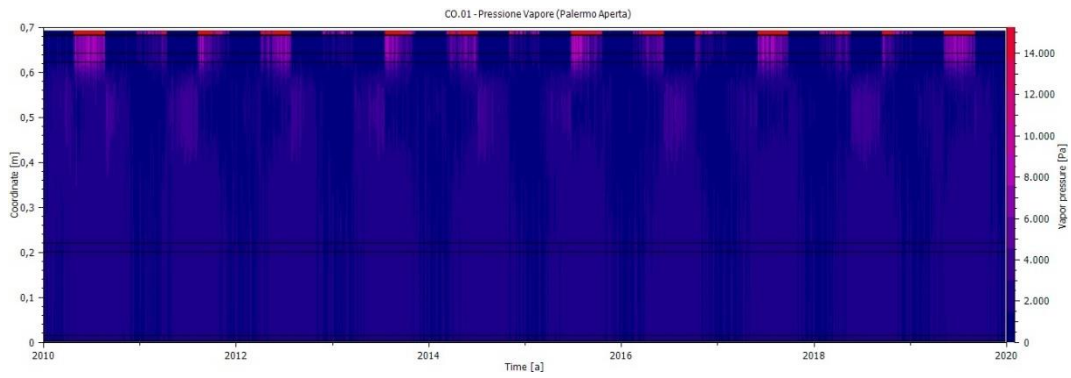
- Temperatura



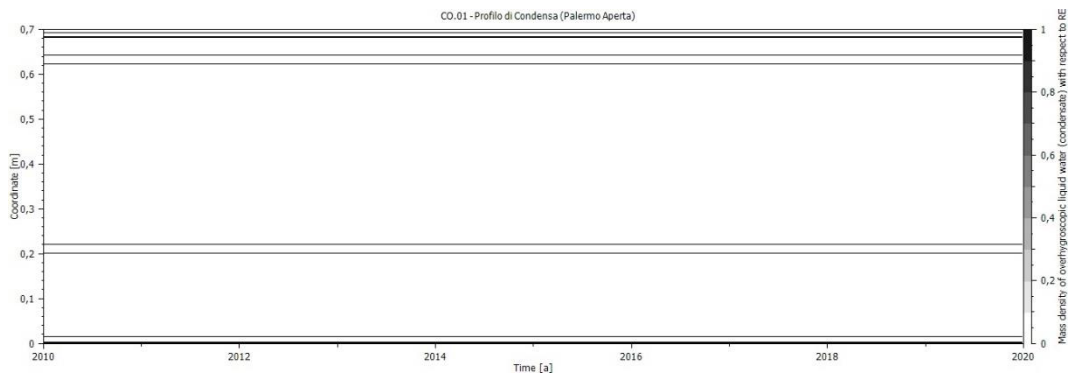
- Umidità Relativa



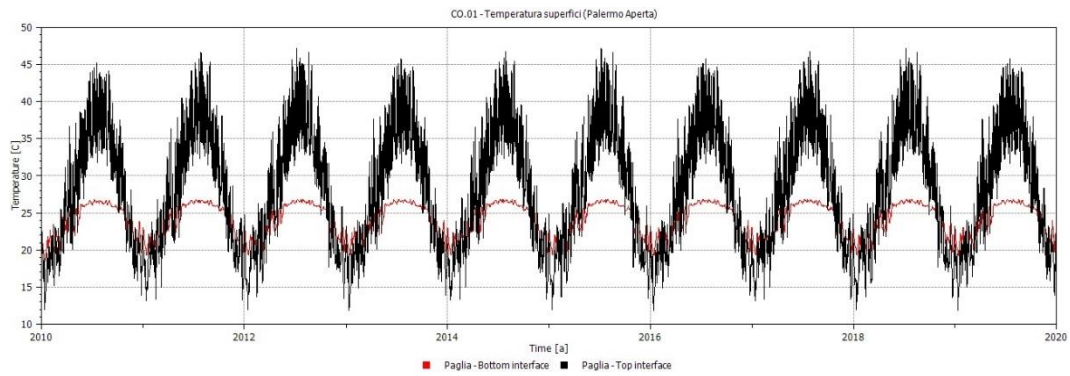
- Pressione di Vapore



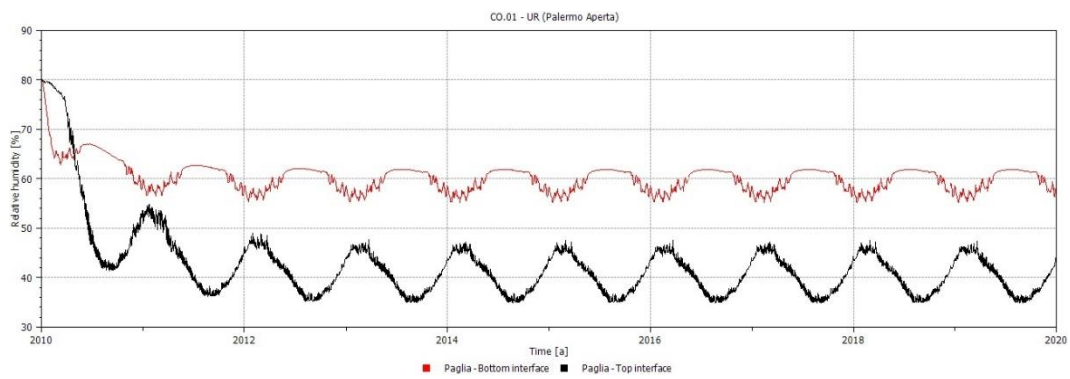
- Profilo di condensa



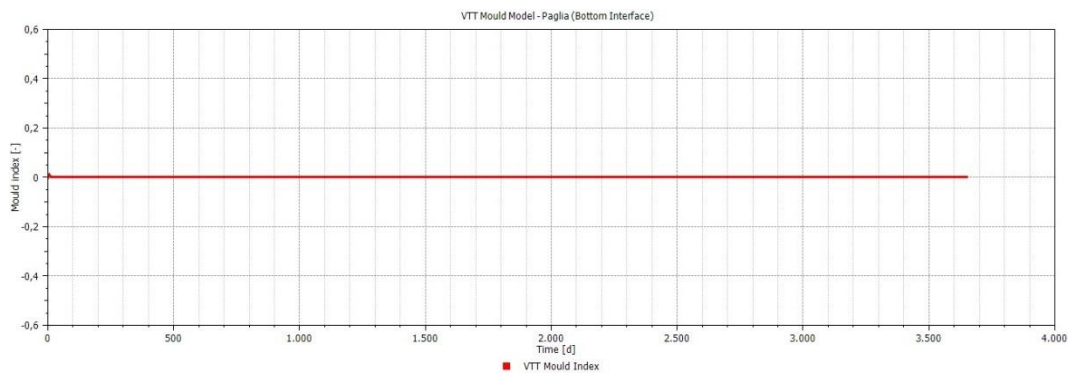
- Temperatura superfici



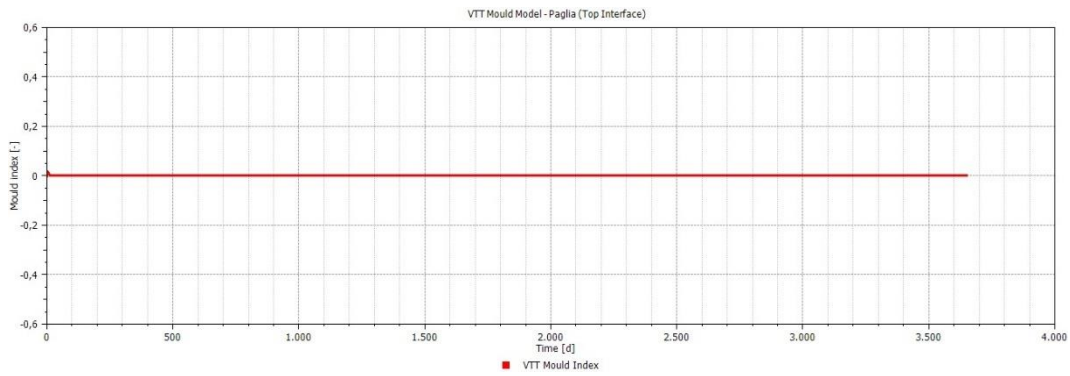
- Umidità Relativa superfici



- VTT Mold Model (Paglia - Bottom Interface)

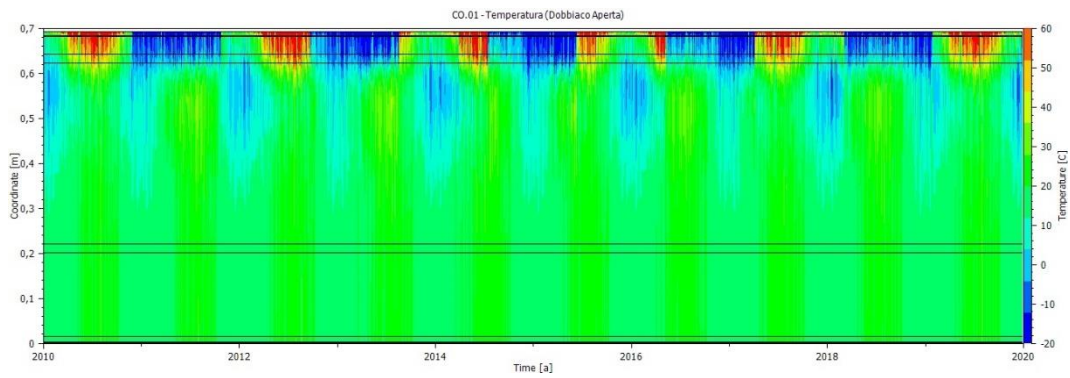


- VTT Mold Model (Paglia - Top Interface)

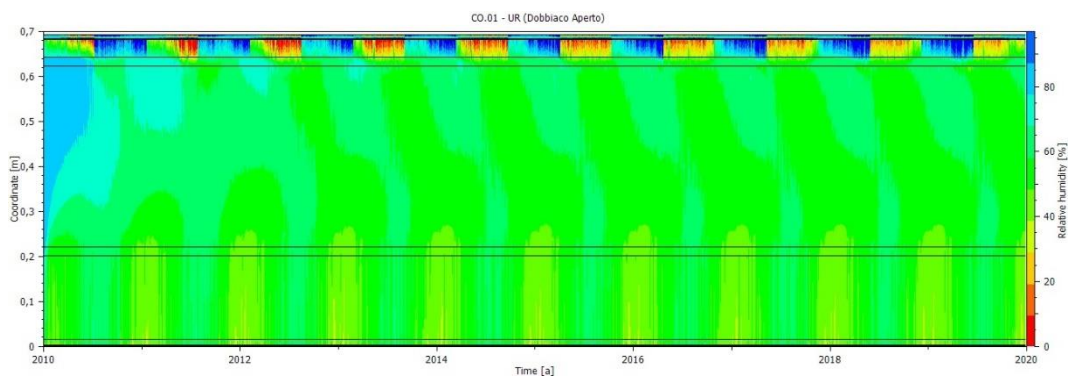


Stratigrafia copertura PABLOK Aperta (Dobbiaco)

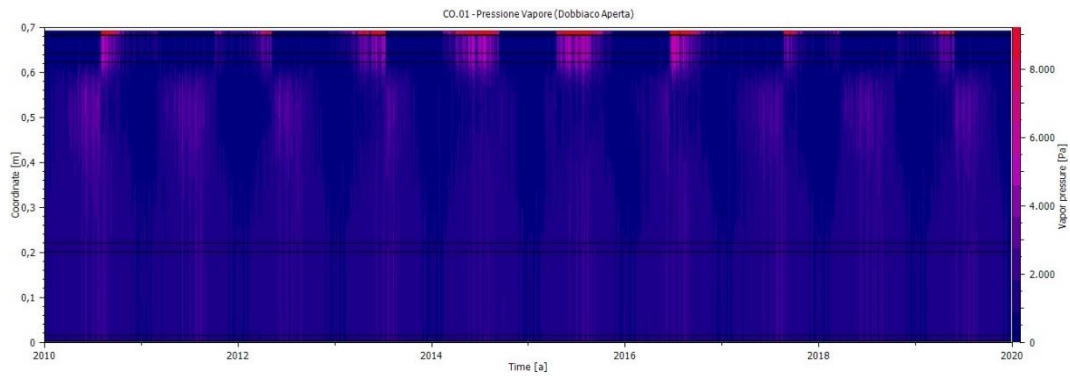
- Temperatura



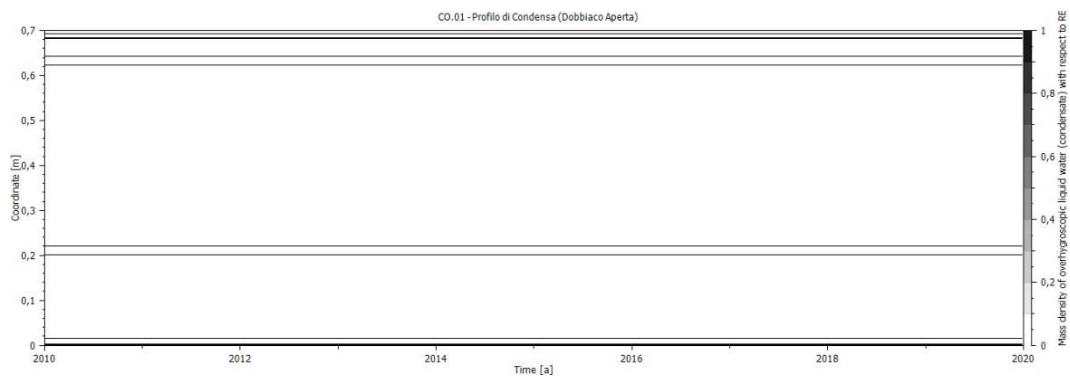
- Umidità Relativa



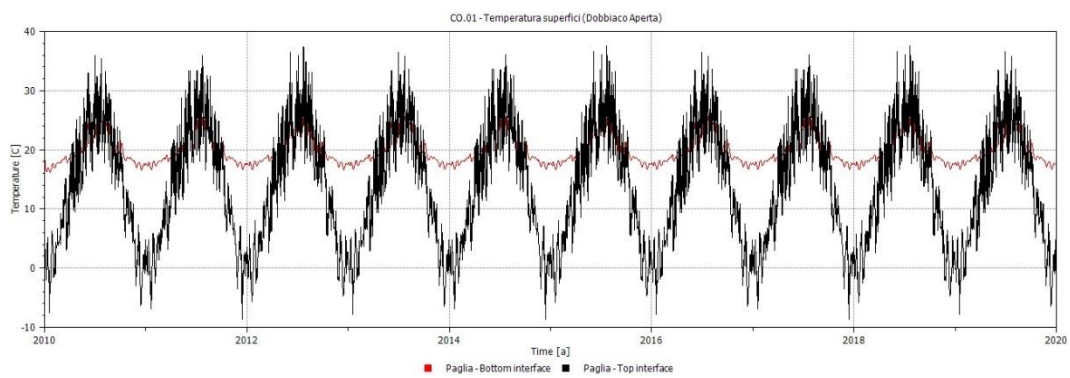
- Pressione di Vapore



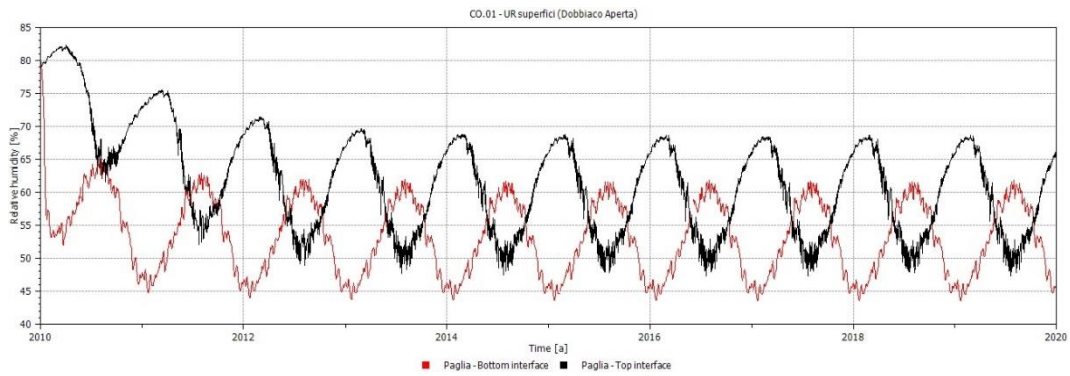
- Profilo di condensa



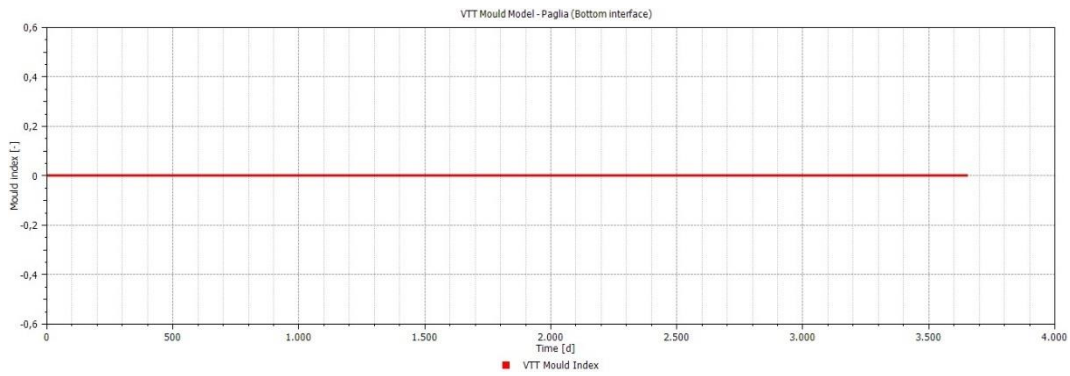
- Temperatura superfici



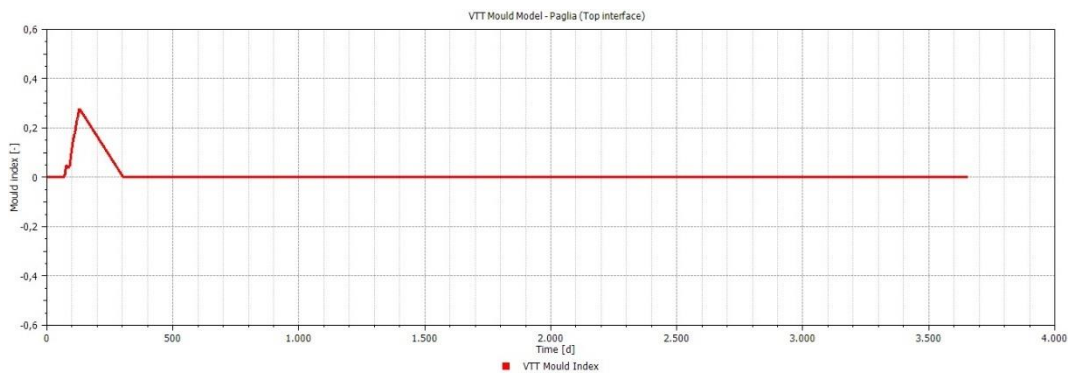
- Umidità Relativa superfici



- VTT Mold Model (Paglia - Bottom Interface)

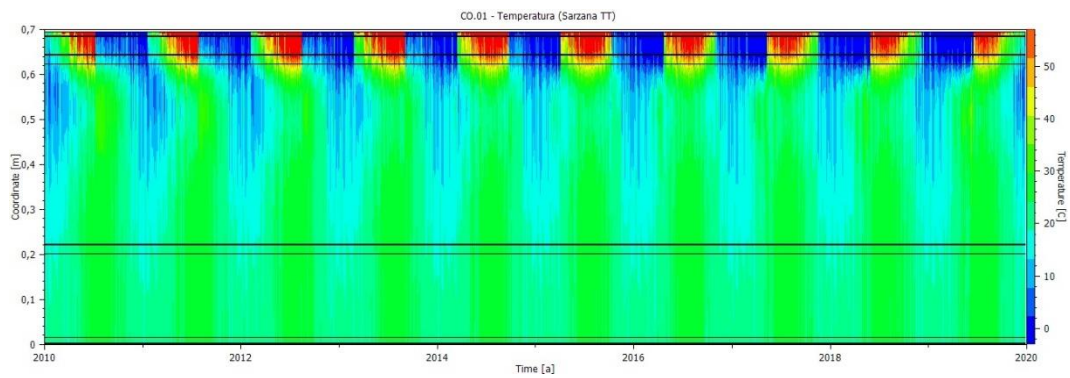


- VTT Mold Model (Paglia - Top Interface)

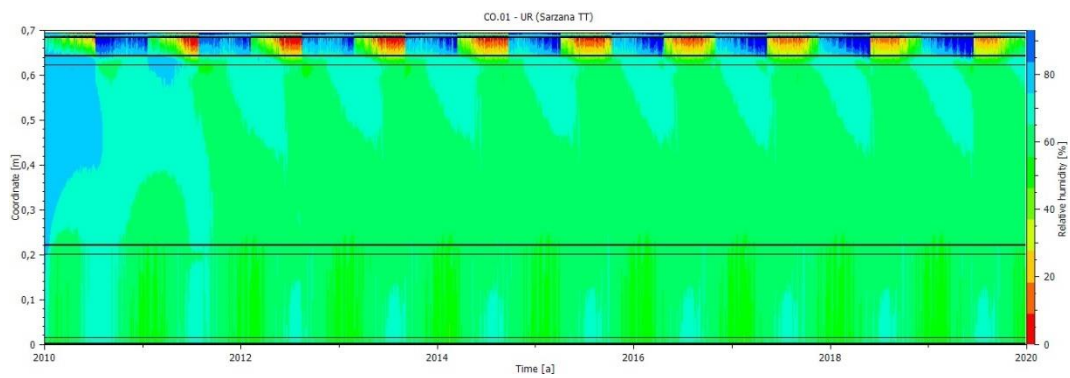


Stratigrafia copertura PABLOK a totale tenuta (Sarzana)

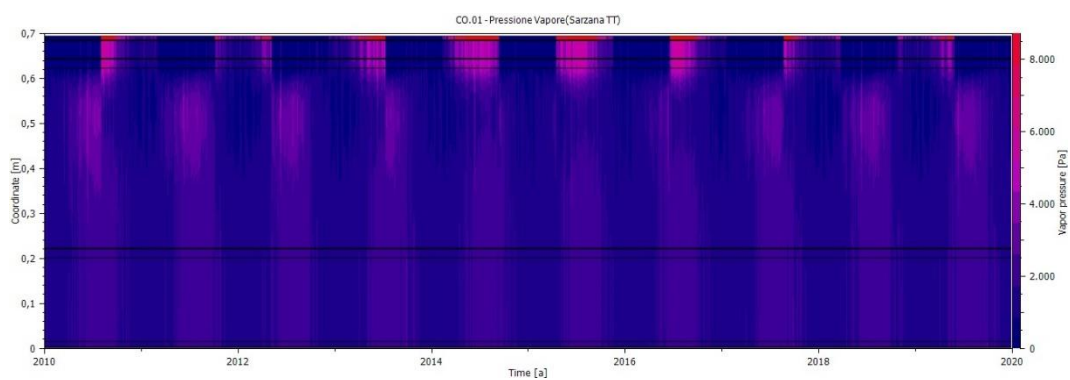
- Temperatura



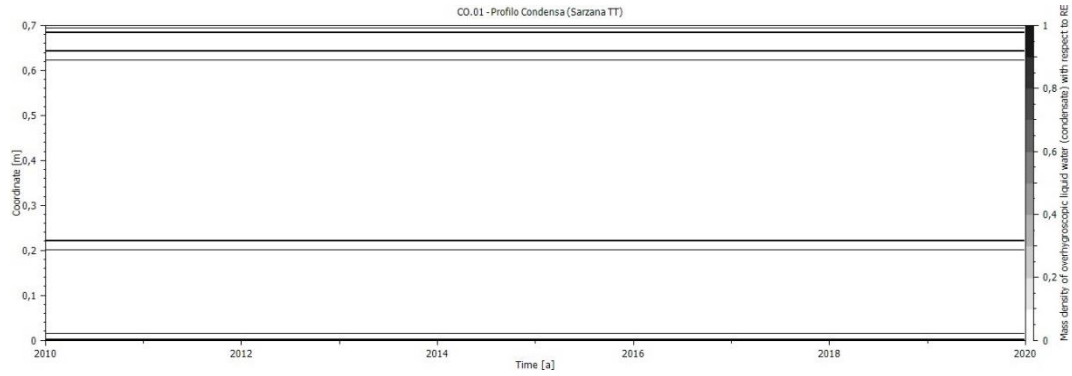
- Umidità Relativa



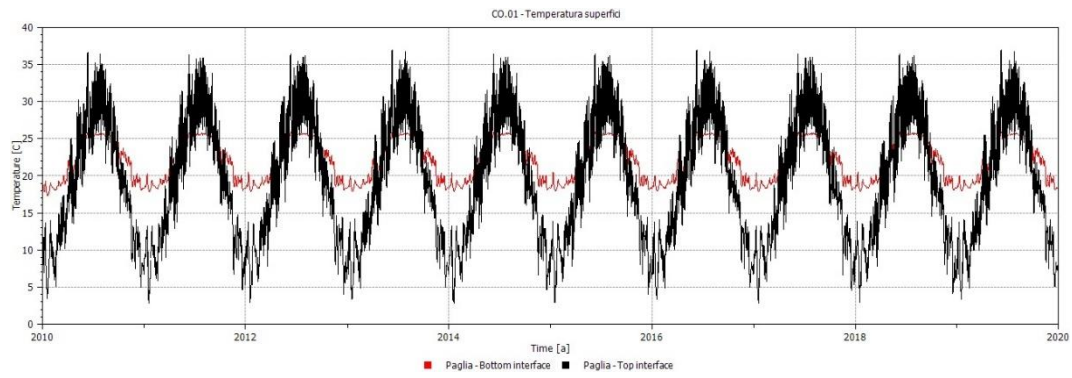
- Pressione di Vapore



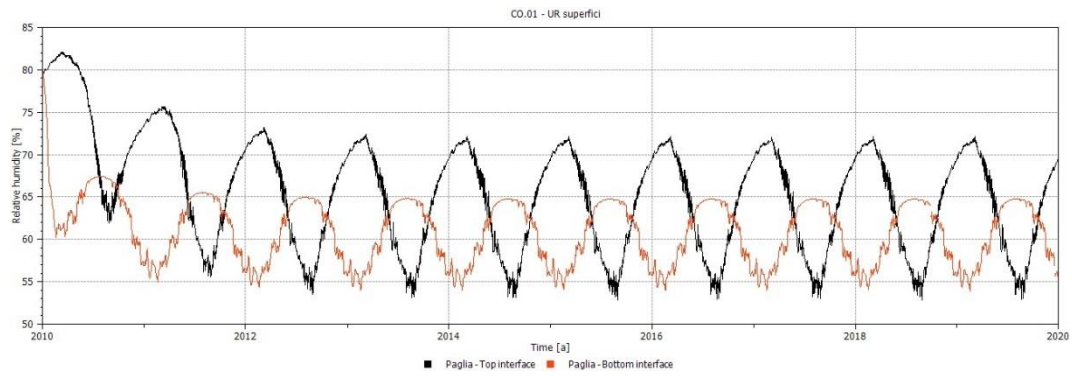
- Profilo di condensa



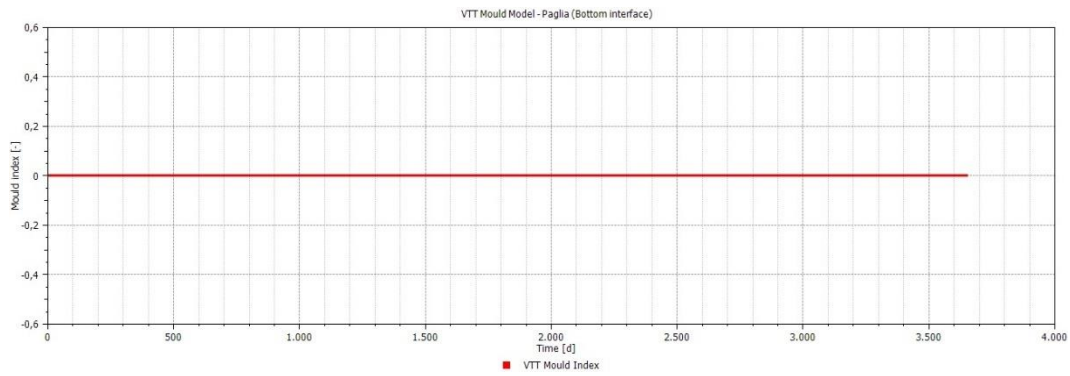
- Temperatura superfici



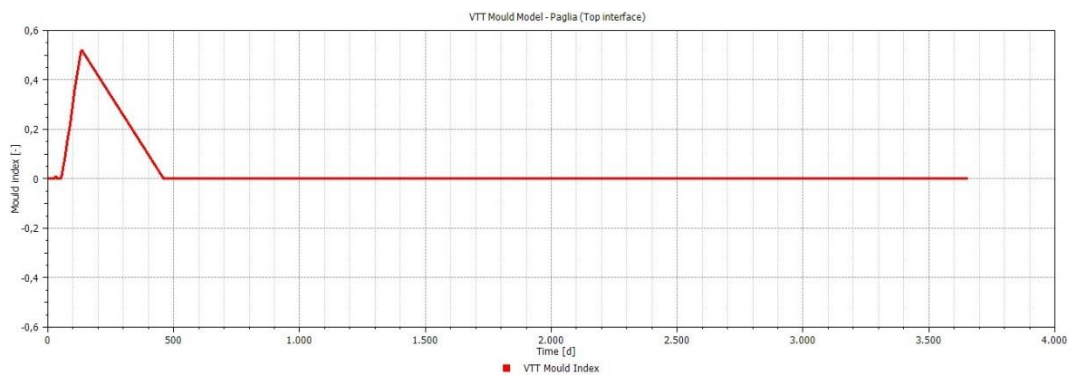
- Umidità Relativa superfici



- VTT Mold Model (Paglia - Bottom Interface)

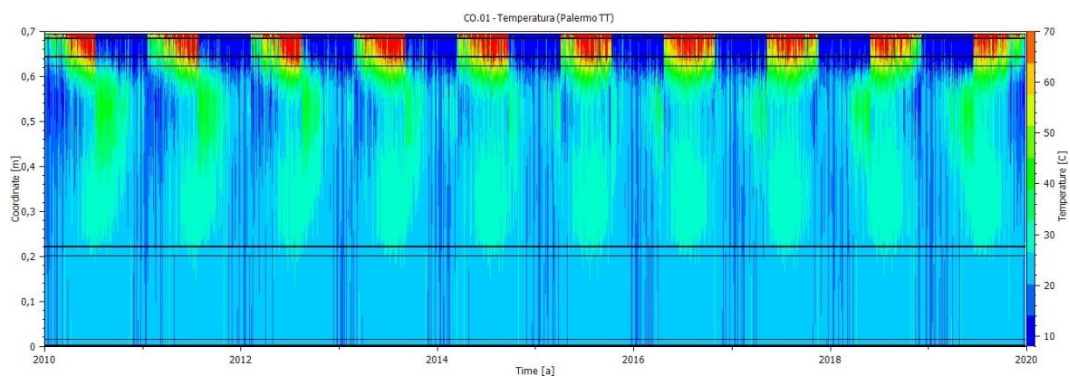


- VTT Mold Model (Paglia - Top Interface)

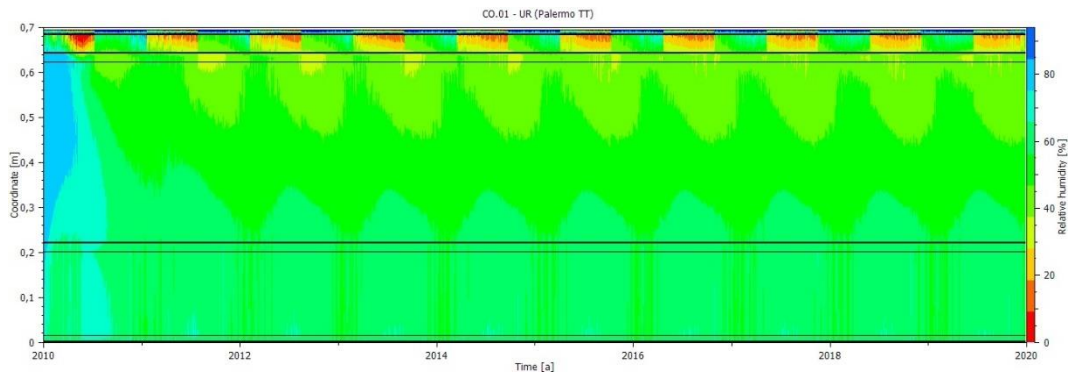


Stratigrafia copertura PABLOK a totale tenuta (Palermo)

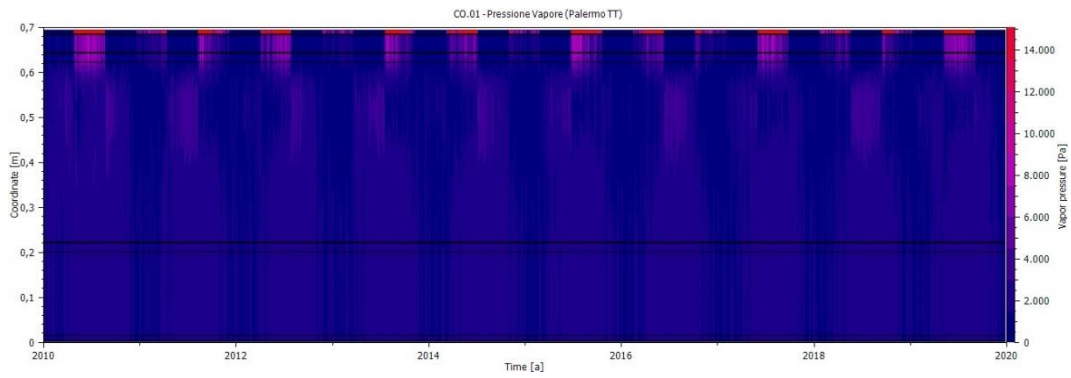
- Temperatura



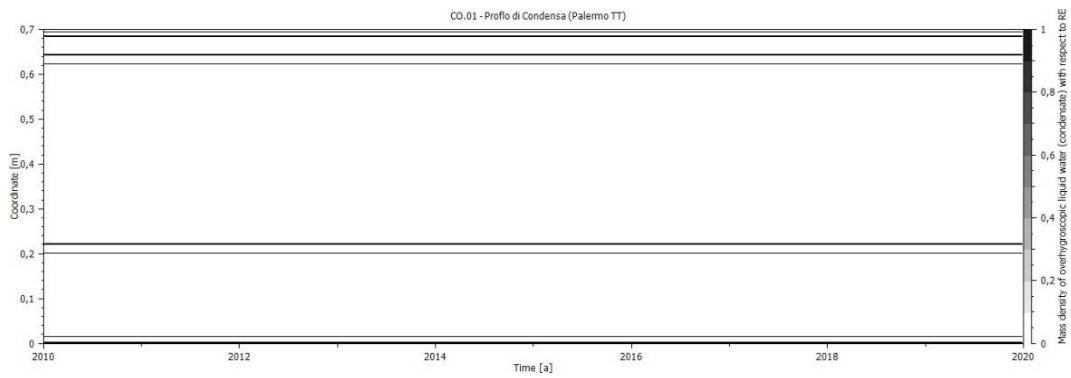
- Umidità Relativa



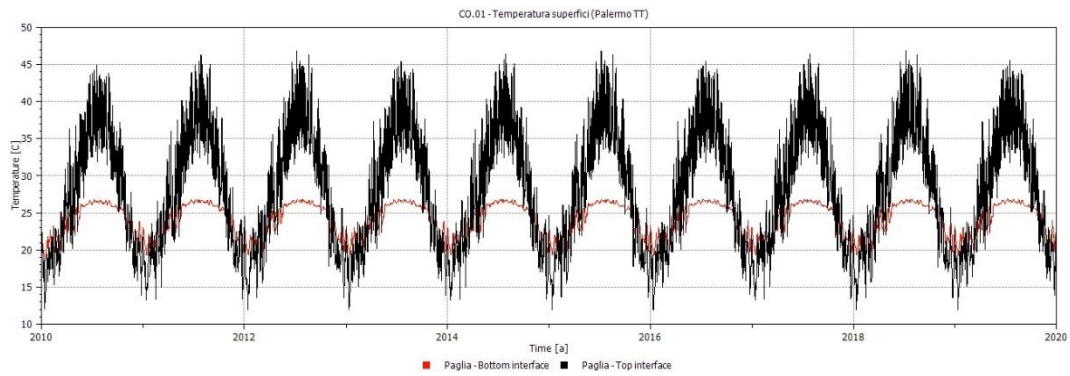
- Pressione di Vapore



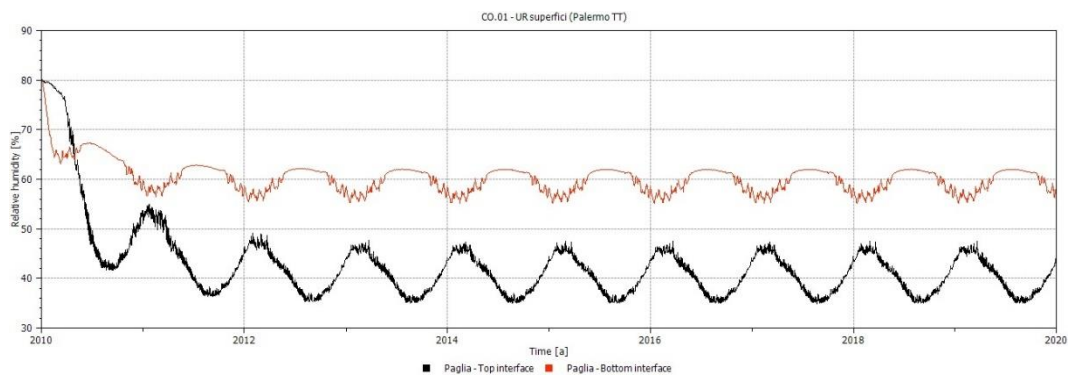
- Profilo di condensa



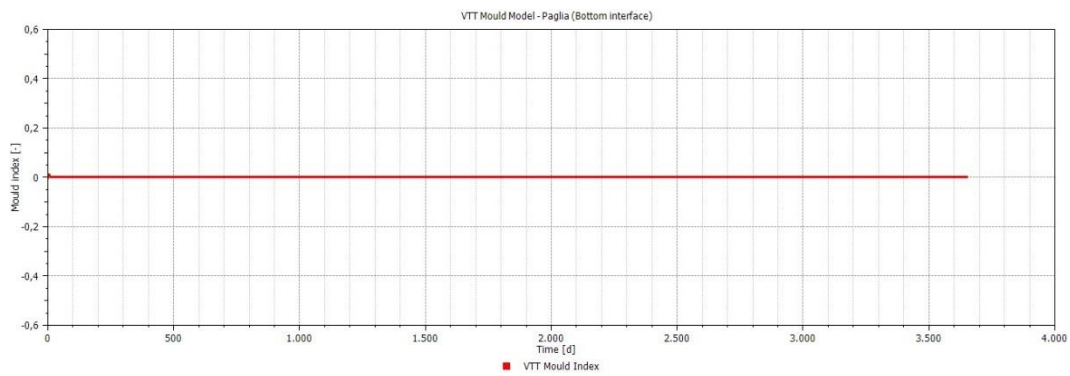
- Temperatura superfici



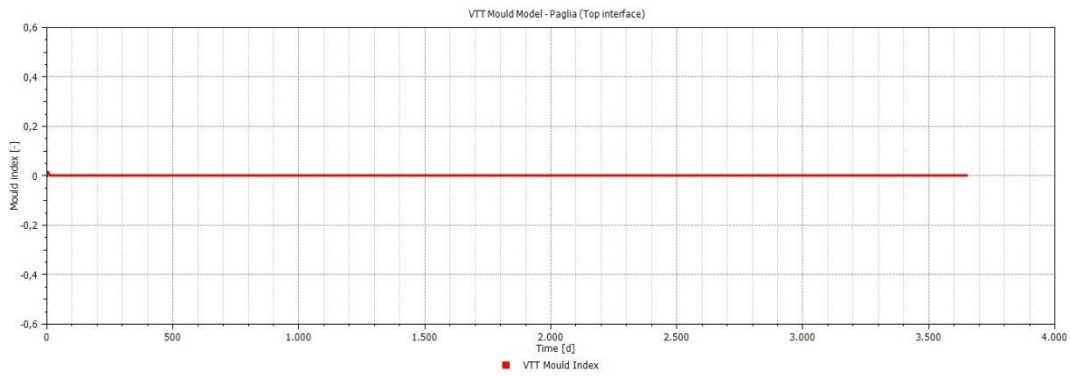
- Umidità Relativa superfici



- VTT Mold Model (Paglia - Bottom Interface)

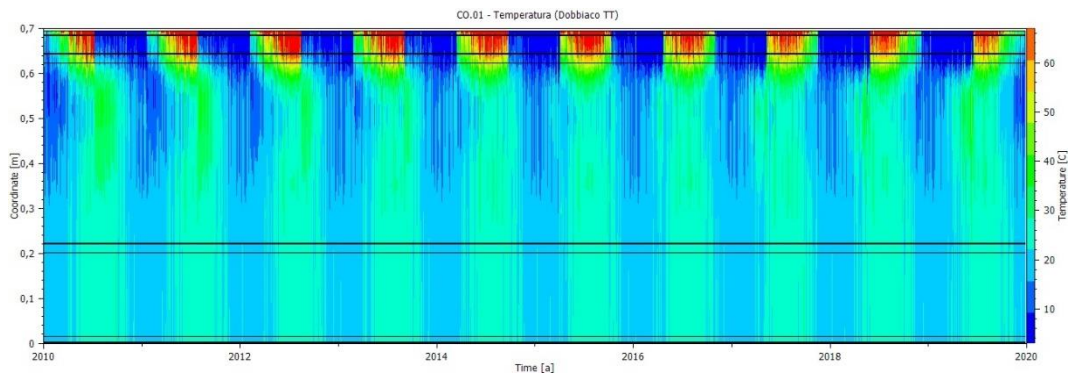


- VTT Mold Model (Paglia - Top Interface)

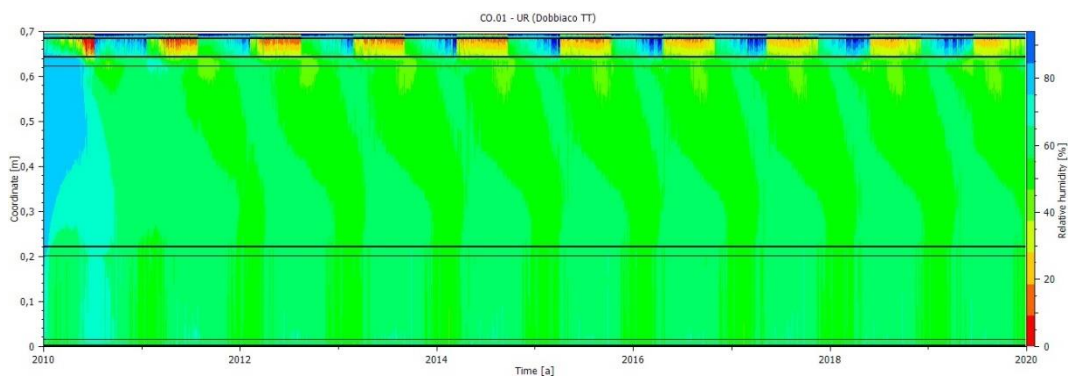


Stratigrafia copertura PABLOK a totale tenuta (Dobbiaco)

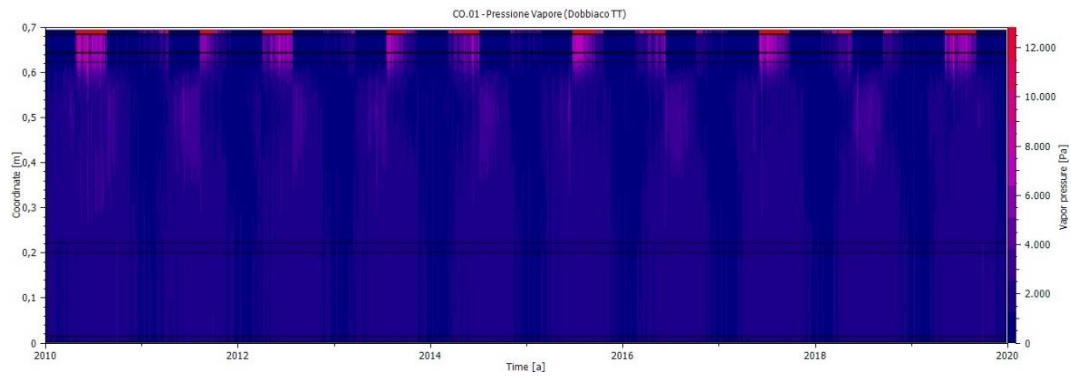
- Temperatura



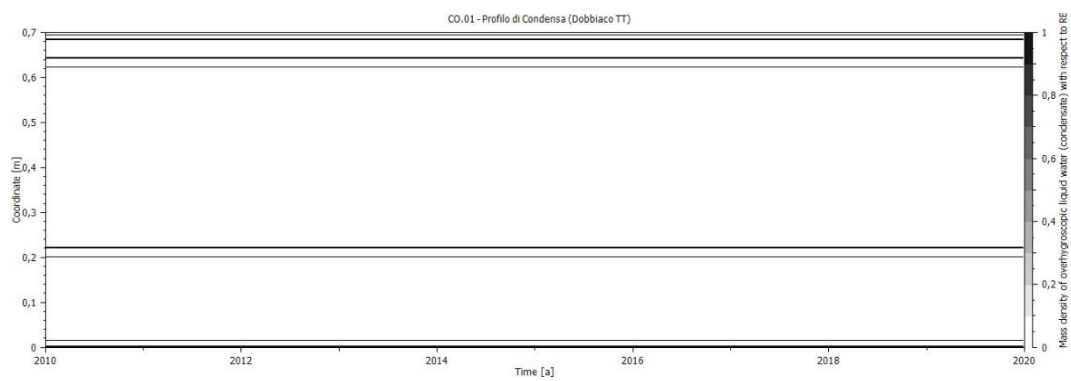
- Umidità Relativa



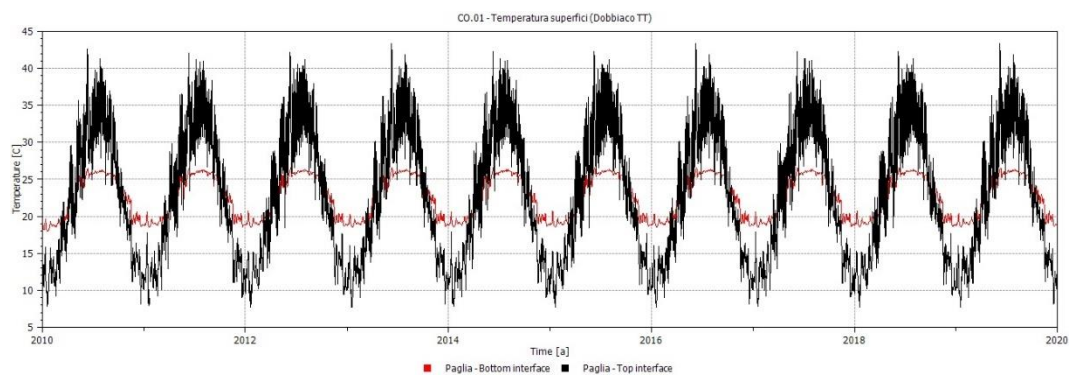
- Pressione di Vapore



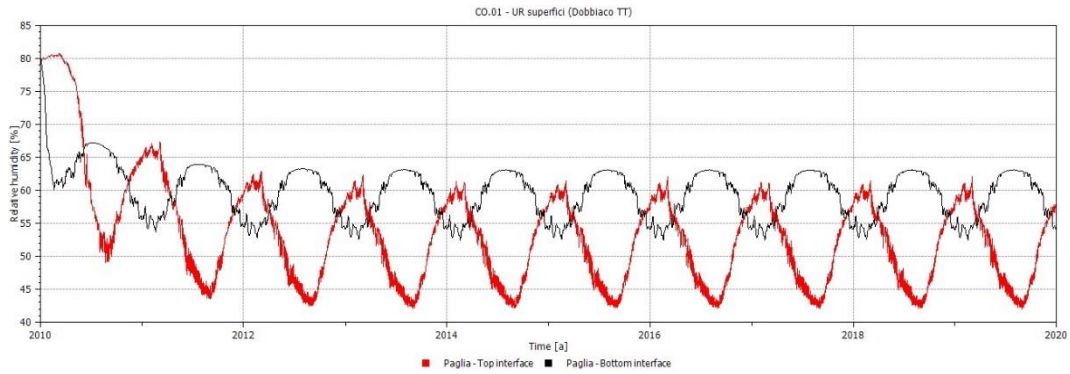
- Profilo di condensa



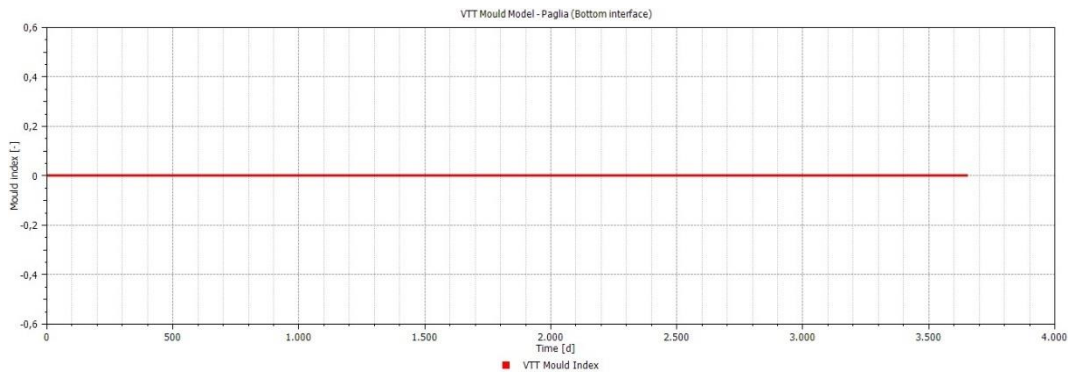
- Temperatura superfici



- Umidità Relativa superfici



- VTT Mold Model (Paglia - Bottom Interface)



- VTT Mold Model (Paglia - Top Interface)

