UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTÀ DI INGEGNERIA
LAUREA MAGISTRALE
in Ingegneria Edile

Prove sperimentali sulla durabilità di isolanti per applicazioni in sistemi a cappotto

Experimental test on the durability of insulators for applications in external insulation systems

Relatrice:
Prof.ssa Francesca Stazi

Laureando:
Luca Andreani

Correlatori:
Prof.ssa Francesca Tittarelli

Prof. Costanzo Di Perna

Anno Accademico 2020/2021

INDICE

ABSTRACT **1**

1. STATO DELL'ARTE **2**

2 OBIETTIVO DELLA TESI **3**

3 FASI DELLA SPERIMENTAZIONE **4**

4 MATERIALI **6**

4.1. ISOLANTI 6

a. INTONACO 9

b. PROVINI 10

i. Provini quadrati 30x30 cm 10

ii. Provini quadrati 20x20 cm 11

iii. Provini circolari 16 cm 11

5 ARTICOLAZIONE **12**

5.1. Analisi per la caratterizzazione delle malte mediante microscopia elettronica a scansione (SEM) 12

5.2. Determinazione del coefficiente di assorbimento d'acqua 16

5.3. Determinazione dell'aderenza al supporto 18

5.4. Determinazione della permeabilità al vapore d'acqua 20

5.5. Determinazione della conducibilità termica con il metodo del termo flussimetro. 23

6. INVECCHIAMENTO ARTIFICIALE **27**

6.1. CAMERA NEBBIA SALINA 28

6.1.1. Strumenti e materiali utilizzati 28

6.1.2. Principio di realizzazione della camera salina 30

6.1.3. Costruzione della camera 32

6.2. PROCEDIMENTO DELLA PROVA: cicli di invecchiamento 38

6.3. PROVINI 38

7. RISULTATI TEMPO T=0 ..... **39**

7.1. Analisi per la caratterizzazione mediante microscopia elettronica a scansione (SEM) 39

7.2. Determinazione del coefficiente di assorbimento d'acqua 43

7.3. Determinazione dell'aderenza al supporto 45

7.4. Determinazione della permeabilità al vapore d'acqua 46

7.5. Determinazione della conducibilità termica con il metodo del termoflussimetro 48

8. RISULTATI POST INVECCHIAMENTO – Aged **49**

8.1. Analisi per la caratterizzazione mediante microscopia elettronica a scansione (SEM) 50
8.2. Determinazione del coefficiente di assorbimento d'acqua 53
8.3. Determinazione dell'aderenza al supporto.....54
8.4. Determinazione della permeabilità al vapore d'acqua.....56
8.5. Determinazione della conducibilità termica con il metodo del termoflussimetro 58
9. DISCUSSIONE 60
10. CONCLUSIONI 72
BIBLIOGRAFIA.....73
11. ALLEGATI 75
12. RINGRAZIAMENTI 83

ABSTRACT

L'oggetto della tesi è lo studio del comportamento termoigrometrico di sistemi a cappotto sottoposti ad invecchiamento artificiale mediante l'esposizione ad un ambiente salino, tipico delle zone costiere.

Si valuta la durabilità di 4 sistemi di cappotto costituiti da isolanti quali: Sughero, Fibra di Legno, Lana di Roccia e Lana di Vetro. Agli stessi viene applicato un intonaco per tutti uguale, costituito da un rasante ed una finitura.

L'attività sperimentale si è svolta principalmente in 4 fasi distinte: caratterizzazione a T=0 (28 giorni), invecchiamento artificiale, caratterizzazione a seguito dell'invecchiamento e confronto.

Sono state effettuate caratterizzazioni (chimica, morfologica e fisica) pre e post invecchiamento artificiale per la corretta definizione del comportamento termoigrometrico. La caratterizzazione chimica è avvenuta per mezzo della spettroscopia EDX. La caratterizzazione morfologica è ottenuta attraverso il microscopio elettronico a scansione (SEM) ed infine quella fisica attraverso varie prove: determinazione del coefficiente di assorbimento d'acqua, della permeabilità al vapore d'acqua, della conducibilità termica e dell'aderenza al supporto.

1. STATO DELL'ARTE

La presente tesi riguarda la durabilità di sistemi a cappotto.

Si definisce isolamento a cappotto l'intervento che va a coibentare un muro perimetrale dall'esterno creando uno strato uniforme senza discontinuità, offrendo ottime prestazioni coibenti. Il sistema è costituito da pannelli rigidi di adeguate dimensioni, generalmente 100x50 cm, con spessori variabili a seconda del grado di coibentazione richiesto; a questi viene poi steso uno strato rasante con inglobata una rete in fibre, generalmente di vetro, ed un ulteriore strato che funge sia da finitura che da protezione contro agenti atmosferici. Grazie alla versatilità e alla facilità di applicazione, il sistema a cappotto sembra essere una soluzione interessante in grado di offrire una risposta alle problematiche tecniche, geometriche e architettoniche degli edifici. Inoltre, può essere applicato per risolvere i ponti termici caratterizzati come una discontinuità costruttiva in cui il flusso termico trasmesso è superiore rispetto ai componenti adiacenti (punti di giunzione tra elementi diversi).

Tuttavia, tali sistemi possono presentare problemi sulle facciate più esposte a seguito dell'invecchiamento. Vari studi scientifici si sono concentrati sul comportamento di sistemi a cappotto nel lungo termine. La maggior parte degli studi ha considerato il decadimento delle prestazioni a seguito di invecchiamento artificiale. Per effettuare la caratterizzazione, diversi studi hanno analizzato la densità, il coefficiente di assorbimento d'acqua, la conducibilità termica, la permeabilità al vapore, lo studio per mezzo della microscopia elettronica a scansione in riferimento anche a vari processi di invecchiamento artificiale accelerato;

Al fine di valutare la durabilità dei prodotti, vengono eseguiti test di invecchiamento artificiale accelerato che alterano notevolmente il campione in esame attraverso di vari cicli di stress termico e fisico in cui vi è la possibilità di controllare le condizioni al contorno. Questo processo simulato serve a ridurre i tempi di attesa e di individuazione delle possibili cause di degrado potendo effettuare considerazioni a diversi step di avanzamento. Esistono diverse modalità per poter ottenere un invecchiamento artificiale:

- Invecchiamenti composti da due fasi principali ad esempio gelo-disgelo o secco-umido [2] [3] [4];
- Invecchiamenti composti da molteplici cicli collegati [5] [6].

Molteplici studi nominano il cloruro di sodio e in particolare l'aerosol marino come principale agente del degrado delle strutture anche a causa del processo di cristallizzazione. I principali fattori che riducono la durabilità delle pareti sono l'impatto simultaneo di soluzioni saline e umidità. Secondo Schaffer [7] .

Non sono stati riscontrati studi sulla caratterizzazione e analisi prestazionale di isolanti per questo tipo di invecchiamento.

Nel presente lavoro è stata posta l'attenzione sui parametri che delineano le caratteristiche e le potenzialità termo fisiche dei prodotti, analizzando la loro durabilità mediante cicli di invecchiamento artificiale a base di nebbia salina in conformità alla UNI EN 14147:2005 [1]. La scelta della nebbia salina a base di NaCl risiede nell'effetto del cloruro di sodio sui prodotti edili e la scelta della normativa sulle pietre naturali enfatizza l'aspetto di aggressività del metodo che punta a sollecitare maggiormente i materiali studiati.

2 OBIETTIVO DELLA TESI

L'obiettivo della tesi è verificare comparativamente il comportamento di sistemi a cappotto sottoposti ad un invecchiamento artificiale, con particolare riferimento alle prestazioni termoigrometriche. La valutazione della durabilità e il possibile decadimento delle proprietà fisiche e termiche risulta essere un aspetto assai interessante per poter valutare la corretta applicabilità dei prodotti in situ, i benefici sul risparmio energetico nel tempo ed il suo effettivo contributo al miglioramento del comfort termico dell'ambiente in cui verrà applicato.

Per raggiungere tale obiettivo sono stati analizzati diversi isolanti e sistemi di isolante con intonaco (ETICS). Sono avvenute due tipi di caratterizzazioni: una a tempo T=0 e una a seguito dell'invecchiamento artificiale. La prima fase è avvenuta successivamente alla stagionatura a 28 giorni seguendo le prescrizioni di maturazione di ogni specifico provino. La seconda caratterizzazione è avvenuta successivamente a 60 cicli di

invecchiamento mediante la nebbia salina sempre facendo riferimento alle stesse tipologie di provini a tempo T=0.

L'invecchiamento artificiale accelerato risulta essere una strategia molto utilizzata in letteratura [3], al fine di ridurre notevolmente i tempi di attesa del processo di decadimento di un prodotto sotto l'effetto di determinate condizioni al contorno controllabili. Si è valutato di utilizzare un invecchiamento artificiale seguendo la UNI EN 14147:2005.

La norma UNI EN 14147 pone l'attenzione sull'invecchiamento artificiale mediante nebbia salina e la scelta di questa procedura mostra l'interesse sulla ricerca di una tipologia di invecchiamento aggressivo caratterizzato dalla presenza di NaCl in quanto la cristallizzazione del sale provoca crepe, efflorescenze, aumento della igroscopicità, e diminuzione complessiva della funzionalità e della durabilità delle malte da muratura e da rivestimento [8][9]. In particolare, si pone l'attenzione sulla valutazione dell'effetto della presenza di cloruri sulle proprietà termiche, fisiche e chimiche di tipologie destinate all'isolamento termico.

3 FASI DELLA SPERIMENTAZIONE

PRIMA FASE: Caratterizzazione a T= 0 (28 giorni)

Vengono preparati i provini seguendo i criteri di stagionatura normati. Trascorsi i 28 giorni di stagionatura a temperatura e umidità relativa prefissate, vengono effettuate le prove, denominate a tempo T=0 che vengono successivamente descritte nel dettaglio nei capitoli successivi.

Sono state effettuati diversi tipi di caratterizzazione pre e post invecchiamento artificiale, attraverso le seguenti prove normate:

1. analisi per la caratterizzazione mediante microscopia elettronica a scansione (SEM);

2. determinazione del coefficiente di assorbimento d'acqua a lungo termine per immersione parziale UNI EN 12087 [11];

3. determinazione dell'adesione al supporto UNI EN 1542 [10];

4. determinazione della permeabilità al vapore d'acqua UNI EN 12086 [12];

5. determinazione della conducibilità termica con il metodo del termoflussimetro UNI EN 12664 [13] ;

Ultimo step di questa prima fase consiste nella raccolta e nell'elaborazione dei dati.

SECONDA FASE: Invecchiamento artificiale mediante l'esposizione all'attacco da nebbia salina

La seconda fase consiste nel sottoporre i provini precedentemente preparati al processo di invecchiamento artificiale mediante cicli di nebbia salina. La prova ha una durata di 720 ore per un totale di 30 giorni in cui si alternano condizioni di ambiente salino (240 ore) e condizioni di essiccazione (480 ore), bloccando la formazione della nebbia.

TERZA FASE: Caratterizzazione a seguito dell'invecchiamento artificiale

A seguito dell'invecchiamento artificiale, avviene la caratterizzazione come nella prima fase al fine di effettuare un'indagine comparativa a seguito dell'esposizione da attacco salino. Vengono poste le medesime condizioni al contorno per ogni prova in modo da tale da valutare correttamente la durabilità. Per cui vengono ripetute le stesse prove riportate in fase 1.

QUARTA FASE: Confronto pre e post invecchiamento artificiale

La quarta fase permette di riassumere tutte le prove e le analisi precedentemente effettuate. I dati raccolti vengono riassunti e messi a sistema per mezzo di grafici esplicativi.

4 MATERIALI

4.1. ISOLANTI

Per la seguente sperimentazione si è deciso di prendere in considerazione e studiare tipologie di isolanti diversi da quelli in Polistirene, ci si è orientati verso materiali naturali o comunque con utilizzo più di nicchia.

Possiamo suddividerli in due classificazioni:

INORGANICI SINTETICI	ORGANICI NATURALI
Lana di Roccia	Sughero
Lana di Vetro	Fibra di Legno

- **LANA DI ROCCIA**

È un materiale fibroso, le cui materie prime di partenza sono costituite da diabase, dolomite e basalto. Il processo di produzione della lana di roccia ha inizio con la fusione della roccia vulcanica a una temperatura di circa 1600°C. Una volta fusa, viene sottoposta a centrifugazione che ne determina lo stiramento in un filamento incandescente che, raffreddandosi, da origine alla fibra minerale.

Grazie alla sua natura inorganica, è in grado di resistere all'attacco di agenti biologici, è imputrescibile, chimicamente inerte, non viene alterata da soluzioni alcaline deboli, acidi e solventi organici. Data la sua elevata porosità a celle aperte la sua permeabilità al vapore è molto elevata. Le materie prime necessarie alla produzione, seppur non rinnovabili, sono presenti in grandi quantità. A fine vita il prodotto può essere riciclato.

Per quanto riguardano gli impatti sulla salute sono state introdotte disposizioni normative che richiedono una composizione specifica per poter essere dichiarate innocue per la salute.

- **LANA DI VETRO**

Appartiene alla famiglia delle lane minerali artificiali e viene ottenuta dagli stessi componenti minerali utilizzati per la produzione di vetri comuni, dosati però in

modo differente: sabbia quarzitica, soda e pietre calcaree. Nella composizione è ormai presente per almeno il 50% di vetro riciclato, percentuale che in alcuni prodotti può raggiungere anche l'80%. Le materie prime vengono mescolate in una vasca riscaldata elettricamente, successivamente il composto viene fuso in un forno alla temperatura di circa 1500°C. la trasformazione del vetro fuso in fibre può avvenire per stiramento meccanico del filamento uscente da un foro situato sotto il bagno di vetro fuso, per utilizzo di getti di fluido gassoso sul filamento, o per azione della forza centrifuga, combinata all'azione di un bruciatore a gas. Dopo il fibraggio le fibre vengono trattate con resine sintetiche o impregnate con oli minerali.

Come tutti i prodotti di origine minerale, anche la fibra di vetro è un materiale con elevate caratteristiche di stabilità, sia come coefficiente di dilatazione termica, sia come deformazioni sotto l'azione di elevata umidità. Data la sua natura inorganica è in grado di resistere all'attacco di agenti biologici, è imputrescibile, chimicamente inerte non viene alterata da soluzioni alcaline deboli, acide, solventi organici.

A fine vita i prodotti possono essere riciclati. Per quanto riguarda gli impatti sulla salute, sono state introdotte disposizioni normative che richiedono una composizione specifica per poter essere dichiarate innocue per la salute.

- **FIBRA DI LEGNO**

Le fibre di legno sono ricavate da scarti di lavorazione di legname resinoso, da conifere e latifoglie, non trattato chimicamente. Per ottenere la fibra il materiale legnoso viene sminuzzato e poi sfibrato attraverso processi termomeccanici. Per la produzione dei pannelli, le fibre vengono miscelate con acqua e additivi, che migliorano la resistenza al fuoco e l'attacco di parassiti e riducono la marcescenza. La pasta ottenuta viene privata dell'acqua di lavorazione, stesa in forma pressata. Viene sottoposto a una fase di essiccazione e poi tagliato e misurato

Permeabili al vapore, hanno buone proprietà igroscopiche, assorbendo e rilasciando l'acqua molto rapidamente, fungono quindi da regolatori dell'umidità; sono però putrescibili in caso di umidità persistenti.

La fibra di legno ha un basso impatto come consumo di risorse naturali in quanto ottenuta partendo da scarti di lavorazioni, e nello specifico, da un materiale rinnovabile quale il legno. Generalmente la produzione avviene in zone ad elevata presenza di legname, favorendo così il contenimento dei consumi e delle emissioni da trasporto della materia prima in stabilimento. A fine vita il materiale, se in buono stato, può essere riutilizzato. Altrimenti, se non trattato o incollato può essere inviato al compostaggio. Durante la lavorazione o in fase di messa in opera, una elevata formazione di polveri è associata alle operazioni di taglio, è quindi necessario dotarsi di mascherina e occhiali protettivi.

- **SUGHERO**

La materia prima utilizzata per la produzione di isolanti in sughero è la corteccia della quercia da sughero o il sughero da riciclo. La quercia da sughero è una pianta mediterranea con una durata di vita dai 150 ai 200 anni, sviluppa una corteccia spessa, spugnosa e resinosa in grado di proteggere la pianta dai parassiti, muffe e disidratazione. Si inizia dalla procedura di distacco della corteccia dal tronco, ogni circa 10 anni. Dalla prima raccolta si ottiene un materiale grossolano che macinato viene utilizzato come isolante. Il materiale viene lasciato stagionare per diversi mesi e poi sottoposto a bollitura fino a 120°C; con questa operazione il sughero aumenta di spessore, si ammorbidisce e viene disinfestato dai parassiti. Il sughero più grossolano è utilizzato come isolante sfuso, mentre il sughero espanso, in autoclave con vapore a circa 350°C, è utilizzato come isolante in pannelli.

Il sughero è un materiale che grazie alla formazione di resina (suberina) viene reso impermeabile all'acqua. Questa resina naturale da protezione anche in caso di attacchi da parassiti. Ha buone prestazioni termoacustiche. Durabilità elevata associata a buona resistenza alla compressione, leggero e flessibile.

Il sughero, anche se proviene da fonti rinnovabili, è disponibile in quantità limitata, dati i tempi molto lunghi di rigenerazione della corteccia. Il sughero ha un ottimo bilancio di CO_2 ed un'energia inglobata molto bassa. Grazie alla sua ottima durabilità è facile che si presenti in ottime condizioni anche a fine vita delle costruzioni, potendo essere riutilizzabile. Per quanto riguarda gli effetti sulla salute, non produce effetti nocivi.

Figura 1: Pannelli in Lana di Roccia, Lana di Vetro, Fibra di Legno e Sughero

Si riportano le schede tecniche dei prodotti in allegato.

a. INTONACO

La norma UNI 11715, da riferimenti per una corretta messa in opera dei sistemi isolanti termici per l'esterno (ETICS). I supporti su cui collocare il pannello possono essere in cls, muratura, legno ecc.

Un aspetto molto importante oltre all'incollaggio e alla tassellatura dei pannelli, è lo strato di intonaco che lo protegge. Questo è costituito da un intonaco di base, detto rasante, nel quale viene immersa una rete in fibra di vetro o carbonio, che funge da anti ritiro ed evita fessurazioni dovute anche a shock termico, poi ad asciugatura avvenuta, viene steso un intonaco di finitura. L'intonaco di base deve avere uno spessore di almeno 8 mm, mentre la finitura di 1,5/2 mm.

Si è scelto di utilizzare un intonaco di base e finitura uguale per tutte le tipologie di isolante, questo per avere un riferimento e condizioni al contorno uguali per tutti.

L'intonaco di base usato è dell'azienda Kerakoll, il Keraklima Eco. Un adesivo/ rasante minerale, eco compatibile, idoneo per l'incollaggio e la rasatura ad alta resistenza dei pannelli isolanti. Monocomponente a bassissime emissioni di sostanze organiche volatili e ridotte emissioni di CO_2, riciclabile come inerte a fine vita.

Come finitura, infine, si è applicato il Kerakover Eco Kompact, sempre dell'azienda Kerakoll. Un rivestimento fibrato organico minerale eco compatibile, colorato nella massa, a base di resine acriliche all'acqua e silossani idrofobizzanti; flessibile e resistente per tutte le applicazioni, consente di realizzare superfici chiuse ad effetto compatto.

Sono stati applicati i seguenti spessori:

- Intonaco di base (rasante) di circa 8 mm
- Finitura di circa 1,5 mm

Figura 2: Intonaco di base, Finitura e Rete in fibra di vetro

Si riportano le schede tecniche dei prodotti in allegato.

b. PROVINI

Le prove selezionate richiedono provini aventi geometrie differenti. Se ne individuano le seguenti tipologie:

1. Provini quadrati 30x30 cm
2. Provini quadrati 20x20 cm
3. Provini circolari 16 cm

Si sono realizzati una duplice copia di provini, una per la caratterizzazione a T0, e l'altra per l'invecchiamento. Sono stati realizzati provini senza e con intonaco; per un totale quindi di 120 provini.

i. Provini quadrati 30x30 cm

Realizzati a partire dai pannelli, che sono stati tagliati con appositi utensili elettrici, al fine di ottenere il più possibile bordi netti e dritti. Questi tipi di provini sono stati utilizzati per la prova di conducibilità, e per la prova di adesione al supporto. Per quest'ultima sono stati applicati dei provini di intonaco circolari con diametro 5 cm ed altezza 2 cm realizzati da tubi di tali dimensioni che fungono da cassero, una volta asciutti vengono poi facilmente tolti.

Figura 3: Provini per prova di conducibilità

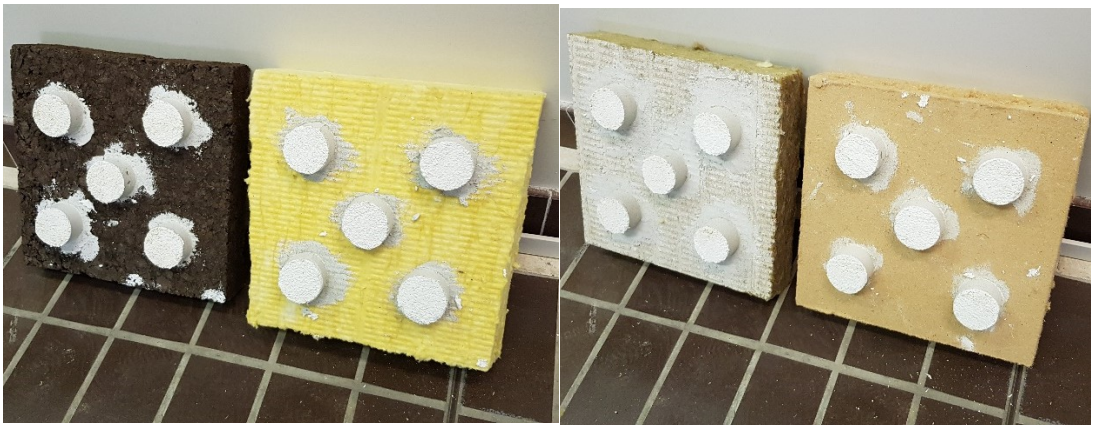


Figura 4: Provini per prova di aderenza.

ii. Provini quadrati 20x20 cm

Ricavati allo stesso modo dei precedenti, sono serviti per la prova di assorbimento d'acqua

Figura 5: Provini per prova di assorbimento

iii. Provini circolari 16 cm

I provini circolari sono stati usati per la prova di permeabilità al vapore d'acqua, ricavati dai pannelli tramite una fresa circolare. Ottenuti poi, da tubi per fognatura, dei cilindri nei quali inseriti i provini. Sono stati sigillati alle due estremità al fine di impedire la fuoriuscita di vapore durante la prova.

Figura 6: Provino per prova di permeabilità

5 ARTICOLAZIONE

5.1. Analisi per la caratterizzazione delle malte mediante microscopia elettronica a scansione (SEM)

Le analisi per la caratterizzazione microscopia elettronica a scansione utilizzano un fascio di elettroni nel vuoto che scansionano il campione seguendo un determinato pattern consentendo di ottenere un'immagine di alta qualità. Il sistema viene mantenuto sottovuoto per evitare interferenze. È composto da elementi elettronici e da un sistema di lenti elettromagnetiche che consistono in una bobina di fili all'interno di poli magnetici metallici. Dal contatto tra la superficie del campione e il flusso di fasci di elettroni, si generano diversi segnali che portano altrettante diverse informazioni. In particolare, possiamo ricordare i tre segnali più importanti e più utilizzati:

1. Elettroni retro diffusi (BSE), rappresentano quella porzione di elettroni del fascio che viene riflessa con energia che va da 50 eV fino a quella di incidenza. Sono portatori di segnali principalmente compositivi e morfologici (topografici) e provengono da profondità massime di alcuni µm. La quantità di BSE dipende oltre che dalla morfologia della superficie anche dal numero atomico medio del materiale presente nel piccolo volume irradiato dal fascio. L'immagine BSE rispecchia la variazione del numero atomico medio all'interno del campione e

permette quindi di individuare i minerali che costituiscono le diverse parti del campione.

2. Elettroni secondari (SE), sono gli elettroni in origine legati ai livelli atomici più esterni, che ricevono dal fascio incidente un'energia addizionale sufficiente ad allontanarli. Hanno un'energia compresa tra 0 e 50 eV e sono emessi da spessori superficiali del campione (~10nm). Sono frequentemente utilizzati per lo studio della morfologia superficiale.

3. Raggi X, caratteristici degli elementi che compongono il campione in esame, possono essere registrati e discriminati sulla base della lunghezza d'onda (WDS) o dell'energia (EDS). L'intensità di queste radiazioni caratteristiche è proporzionale alla concentrazione dell'elemento nel campione. La microanalisi ai raggi X dà informazioni specifiche circa la composizione degli elementi del campione, in termini di quantità e distribuzione.

Gli elettroni che la prova restituisce vengono acquisti attraverso specifici detector a seconda del tipo di segnale che devono rilevare e grazie alla loro captazione è possibile in maniera praticamente istantanea generare un'immagine. L'immagine generata permette di analizzare la superficie del campione con elevato ingrandimento sino ad arrivare alla nanoscala. Il prodotto in output risulta essere in scala di grigi dove:

- Materiali leggeri - immagini più scure (gli elettroni penetrano di più e quindi ne vengono riemessi pochi)

- Materiali pesanti - immagini più chiare (gli elettroni penetrano meno e quindi ne vengono riemessi molti)

In questo modo si ottengono informazioni riguardo la microstruttura del materiale (forma/morfologia delle particelle) e la dimensione dei pori (sulla base dei vuoti che si vedono), seguendo le indicazioni riportate da Collepardi al [14] nel libro "Il calcestruzzo vulnerabile: prevenzione, diagnosi del degrado e restauro".

Strumenti utilizzati:

Il microscopio elettronico a scansione è costituito principalmente da una colonna lunga circa 1 metro in cui avviene la generazione del fascio di elettroni e una camera dei campioni. All'interno della colonna avviene la focalizzazione degli elettroni su zone desiderate attraverso l'ausilio di opportuni campi magnetici e quindi in questo modo avviene la "scansione" del campione in esame attraverso linee parallele ed equidistanti. Nel presente studio viene utilizzato il microscopio "Vega".

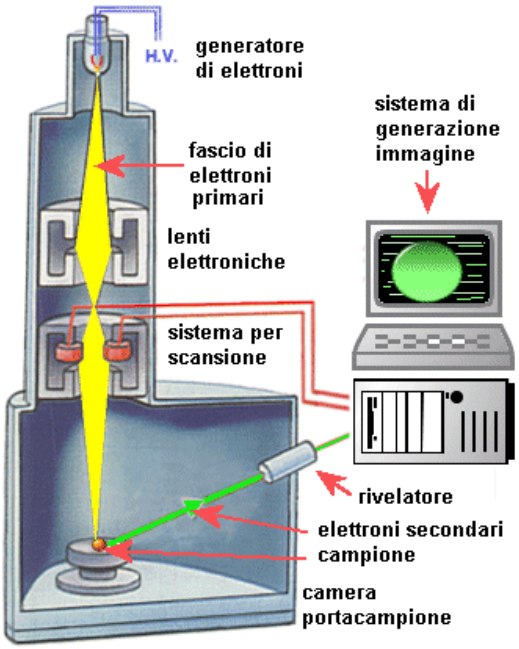


Figura 7: Schematizzazione generale del funzionamento del SEM

Provini:

I campioni vengono prelevati dai provini utilizzati per la prova di conducibilità. I campioni hanno un volume di circa 1 cm^3 e vengono resi conduttivi attraverso una tecnica chiamata *sputtering* che permette di ricoprire la superficie del provino con l'oro. In totale sono state analizzate 4 tipologie di isolanti e la relativa finitura superficiale, nelle due condizioni a T=0 e post invecchiamento al fine di valutarne gli effetti.

Figura 8: Frammenti dei vari campioni

Procedimento:

Il funzionamento di base della SEM si fonda sull'utilizzo di un fascio di elettroni generato mediante un filamento di tungsteno portato ad elevate temperature. Dopo la loro formazione, gli elettroni vengono accelerati con un'energia (da 200 eV a 30 keV) grazie alla presenza di un anodo posto sotto il filamento. Il fascio viene successivamente indirizzato su una serie di lenti elettromagnetiche e grazie a delle bobine di scansione, avviene una deflessione degli elettroni, i quali assumono un movimento alternato lungo linee parallele ed equidistanti per poter ricoprire in maniera corretta tutta la superficie del campione in esame. Infine, avviene l'ultimo indirizzamento del fascio sulla lente finale, il quale esce dalla colonna e colpisce direttamente il campione attraversando il vuoto. Durante il contratto tra il campione e il fascio, quest'ultimo perde energia che viene poi riemessa dal campione sotto diversi segnali, i quali poi andranno a ricreare l'immagine in output. Nelle immagini qui sotto riportate, le componenti salienti della strumentazione effettivamente utilizzata.

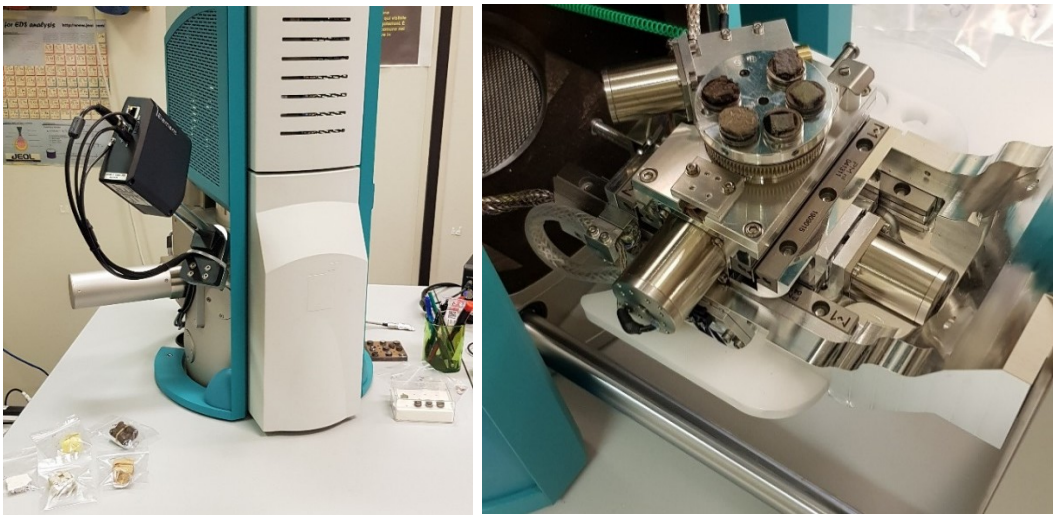


Figura 9: Microscopio Vega con Frammenti dei vari campioni

Criteri di valutazione

- Analisi della microstruttura e della morfologia superficiale dei campioni
- Valutazione degli elementi che compongono le miscele al fine di avere una classificazione univoca

5.2. Determinazione del coefficiente di assorbimento d'acqua

Il metodo si basa sulla misurazione dell'aumento di massa dovuto all'assorbimento capillare di acqua in un intervallo di tempo predeterminato. La massa d'acqua viene espressa come coefficiente che indica la tendenza del campione ad assorbire l'acqua per capillarità, senza applicazione di una pressione esterna. Il coefficiente di assorbimento d'acqua per capillarità è misurato sottoponendo dei provini quadrati a contatto con acqua. I provini precedentemente vengono essiccati a (60±5)°C, fino il raggiungere la massa costante che viene considerata tale se due pesate consecutive a distanza di 24 h non durante l'essicazione non differiscono di oltre il 0,2% della massa totale. Dopo l'essiccazione sino a massa costante, le facce laterali dei provini vengono rese impermeabili e poi immersi in acqua per uno specifico periodo di tempo.

Strumenti utilizzati:

- Bilancia con accuratezza fino allo 0,1% della massa globale del provino.
- Forno ventilato, in grado mantenere una temperatura di (60±5)°C.
- Bacinella.
- Supporti per i provini idonei con superficie di contatto minima e in grado di mantenere i provini ad una profondità prefissata.
- Materiale sigillante, per esempio paraffina o resina sintetica.

Provini:

La fase di formazione e stagionatura della prova sono descritti nel dettaglio al cap. b al paragrafo i

Procedimento:

Dopo la stagionatura a 28 giorni, i provini devono essere essiccati fino a massa costante. Successivamente avviene la sigillatura delle 4 facce lunghe dei provini utilizzando il materiale di sigillatura. Successivamente vengono collocati all'interno di una bacinella tenuti a distanza dalla base di quest'ultima tramite idonei supporti. L' immersione in acqua avviene per una profondità di 10 mm per la durata della prova

I provini vengono pesati rispettivamente in due step: subito prima dall'immersione e dopo 28 giorni. Prima dell'ultima pesata i provini vengono sgocciolati per 10 minuti.

Il coefficiente di assorbimento d'acqua è per definizione uguale al rapporto tra la differenza di massa iniziale e finale sull'area di contatto del provino.

$$W_{ip}=M_{28}-M_0/A_p$$

Viene calcolato il valore medio del coefficiente l'assorbimento d'acqua delle rispettive triplette dai singoli provini

Criteri di valutazione

- Definire il tasso di assorbimento d'acqua dei materiali dovuto all'azione capillare come indicatore dell'assorbimento della pioggia battente per lungo periodo.

5.3.Determinazione dell'aderenza al supporto

Per valutare l'aderenza al supporto si sono svolte prove a strappo sulle diverse tipologie di isolanti, seguendo le specifiche della normativa UNI EN 1542.

La prova di aderenza di uno strato di intonaco al supporto che, nel nostro caso è costituito da pannelli isolanti, presuppone che la verifica vada effettuata attraverso lo strappo (pull-off) di un disco circolare di intonaco, opportunamente creato. L'obbiettivo consiste nella misura della tensione di trazione che il disco esercita, reagendo alle sollecitazioni impresse dall'esterno. Questa tensione non equivale strettamente a quella che la malta ed il supporto esercitano tra loro all'interfaccia, che risulterebbe piuttosto difficile da misurare, date le intime connessioni che i legami chimici riescono ad instaurare tra il legame della malta e la superficie del supporto, bensì ad una tensione di utile riferimento nel rapporto tra la malta ed il supporto. Tale tensione denominata forza di aderenza è stata determinata come lo sforzo minimo di trazione applicato sul supporto, per mezzo di piastre con teste di trazione incollate all'area di prova della superficie delle malte.

La forza di aderenza misurata f_u, in N/mm^2 è il quoziente tra il carico di rottura e l'area di prova. Dunque, lo scopo della prova è osservare come varia l'aderenza al variare della tipologia di isolanti, al fine di avere una caratterizzazione accurata.

Strumenti utilizzati:

- Anelli a profilo conico in acciaio inossidabile, con diametro interno di 50 mm e altezza di 20 mm. Lo spessore delle pareti degli stampi è di 2 mm;
- Olio a base minerale per lubrificare gli anelli conici in modo da evitare l'adesione con le malte;

- Piastre circolari con teste di trazione in metallo con diametro di 50 mm e spessore 10 mm, costituite da un accessorio centrale di raccordo all'apparecchiatura della forza di trazione diretta;
- Adesivo a base di resina epossidica bicomponente;
- Macchina di prova per la prova di trazione diretta, con capacità di applicare il carico alla piastra con teste si trazione tramite un raccordo appropriato che elimini qualsiasi forza di flessione

Provini:

La fase di formazione e stagionatura della prova sono descritti nel dettaglio al cap. b al paragrafo iii

Procedimento:

Una volta terminata la stagionatura, si procede con l'incollaggio di una piastra metallica di diametro pari a 50 mm sui provini di intonaco, attraverso una resina epossidica bicomponente: la norma prescrive una particolare cura nella fase di incollaggio delle piastrine, che vanno centrate sui provini, senza che l'adesivo debordi, influenzando l'adesione tra la malta ed il supporto.

Una volta indurito l'adesivo si procede con la prova applicando, attraverso uno specifico strumento, una forza di trazione perpendicolare alla superficie dell'intonaco, con incrementi di carico compresi tra 0,003N/mm^2*s) e 1,100 N/(mm^2*s).

Si sono poi registrati i carichi di rottura, scartando le prove in cui la frattura è avvenuta in corrispondenza dello strato di adesione tra la piastra con la testa di trazione e la malta. Le singole aderenze f_u, espresse in N/mm^2, sono state calcolate con la formula seguente al più prossimo allo 0,05 N/mm^2.

$$fu = Fu/A$$

Dove:

fu è la forza di adesione in N/mm^2

Fu è il carico di rottura in N

A è l'area di prova dei provini cilindrici in mm^2

In seguito, si è calcolata la forza di aderenza dalla media dei valori ottenuti dai 5 provini per ciascuna tipologia di isolante.

Le ultime considerazioni riguardano la modalità di rottura del provino: se la avviene all'interfaccia tra il supporto e l'intonaco, il valore della tensione di rottura è uguale alla forza di adesione; se avviene invece all'interno della malta o del supporto, la forza di adesione è certamente maggiore di quella ottenuta dalla prova.

Figura 10: Strumentazione prova di adesione e *applicazione della piastra su uno dei 5 provini tipo*

5.4.Determinazione della permeabilità al vapore d'acqua

La presente norma europea specifica un metodo per la determinazione della permeabilità al vapore d'acqua in condizioni di flusso stazionario. Al contrario di quello che accade con l'acqua allo stato liquido, il vapore d'acqua si diffonde con maggiore facilità all'interno delle strutture, quando tra i lati del materiale si stabilisce un gradiente di pressione e temperatura. Il vapore d'acqua modifica il comportamento del materiale isolante, aumentando il valore di conduttività termica ed incrementando quindi le perdite energetiche ed il rischio di condensazioni. Viene definito così il seguente parametro:

- Fattore di resistenza alla diffusione di vapore: $\mu = \frac{\delta_{aria}}{\delta}$ in riferimento alla UNI 12086
    - Con $\delta = W * sp$, cioè la Permeabilità al vapore acqueo.

Un valore basso del Fattore di resistenza μ è indice di alta permeabilità al vapore (molto traspirante).

Strumenti utilizzati:

- Recipienti di prova circolare, costruito con materiale resistente alla corrosione avente un'apertura di circa 0,02 m^2, su cui viene sigillato il campione di prova.

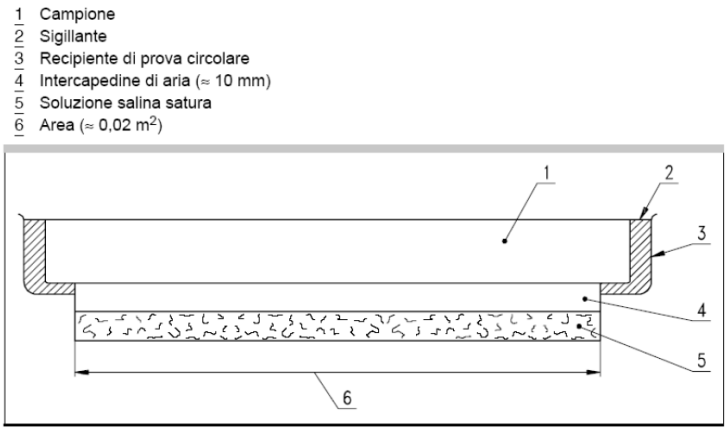


Figura 11: Schema del recipiente di prova fornito dalla normativa

Per poter soddisfare i requisiti da normativa, è stato utilizzato una tipologia di contenitore costituita da un recipiente in polipropilene costituiti da una scanalatura ai lati che permette l'alloggiamento del provino, sigillandolo perfettamente poi con materiale siliconico.

Una volta appoggiato il provino, avviene un processo di sigillatura del perimetro/spazio che rimane tra recipiente e campione.

- Bilancia avente una portata massima di 2 kg e un'accuratezza di 0,1 g.

- Sigillante appropriato, impermeabile la cui massa rimane invariata per il peridio della prova

- Soluzione di nitrato di potassio (NKO_3).

- Camera di prova in grado di mantenere una temperatura di (23±2)°C ed un'umidità relativa del (50±5)%.

Provini:

La fase di formazione e stagionatura della prova sono descritti nel dettaglio al cap. b al paragrafo iii.

Procedimento:

In un primo step avviene la raccolta delle distinte geometriche di ogni provino. In particolare, vengono registrati 4 diametri sulla superficie superiore e inferiore del provino e lo spessore in 4 punti differenti.

I campioni prima di essere sottoposti alle prove, vengono sigillati sopra l'apertura dei recipienti circolari nei quali la pressione di vapore dell'acqua viene mantenuta costante a valori prefissati per mezzo di soluzioni saline sature. Nel caso in esame si è deciso di svolgere la prova solo con la soluzione salina che permette di ottenere un'umidità relativa del 93,2% . I contenitori vengono posti in un ambiente a temperatura controllata dove la tensione di vapore dell'acqua (umidità relativa) è mantenuta costante ad un valore diverso da quella dell'interno dei contenitori. Il flusso dell'umidità attraverso il provino viene valutato in condizioni di stazionarietà a partire dalla variazione di massa dei contenitori.

Quando si deve effettuare la prova in condizioni di elevata umidità relativa, bisogna controllare la tensione del vapore d'acqua all'interno del recipiente utilizzando una soluzione satura di nitrato di potassio. In ogni caso, bisogna lasciare una piccola intercapedine di aria di (10 ± 5) mm tra il campione e la superficie della soluzione. I recipienti di prova vengono disposti nella camera di conservazione a (23±2)°C e umidità relativa di (50±5)%.

I recipienti di prova vengono pesati ad intervalli di tempo appropriati. Le masse vengono riportate su un diagramma in funzione del tempo. Quando tre punti si dispongono su di una linea retta, si ipotizza che sia raggiunta la condizione di stazionarietà, vale a dire, che la quantità di vapore acqueo che attraversa il campione per unità di tempo è costante.

Criteri di valutazione

- Valutazione della resistenza al passaggio del vapore di un materiale al fine di ponderare al meglio l'applicabilità in situ in quanto avere un'elevata permeabilità al vapore implica una migrazione di quest'ultimo riducendo sensibilmente il fenomeno di condensa.

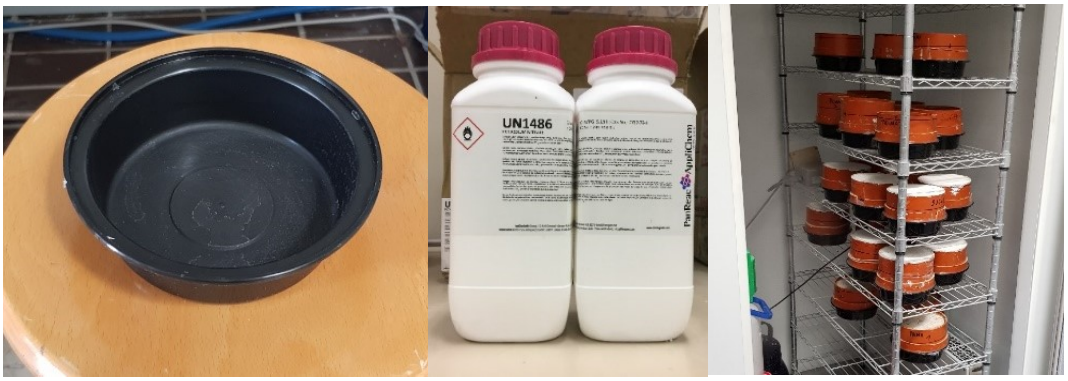


Figura 12: Contenitore in polipropilene, Nitrato di potassio, provini inseriti nella camera climatica

5.5. Determinazione della conducibilità termica con il metodo del termo flussimetro

Per eseguire le prove di conducibilità termica si è fatto riferimento alle specifiche della normativa UNI EN 12667

Lo scopo di tali prove è quello di dedurre la conducibilità termica dei campioni misurando il flusso termico medio scambiato in regime stazionario. Le proprietà termiche descrivono il comportamento di un materiale sottoposto a sollecitazioni nel corso di un processo di scambio termico e quindi di conseguenza mediante una variazione di temperatura. È una particolare proprietà dei materiali che dipende dalla temperatura, dalla densità e dal contenuto di umidità.

Strumenti utilizzati:

- Termocoppie;
- Computer munito del software dedicato al controllo e al calcolo della λ;

- Strati isolanti in PE espanso;
- Piastre collegate ai rispettivi bagni termostatici;
- Anello in lana di roccia.

Provini:

La fase di formazione e stagionatura della prova sono descritti nel dettaglio al cap. b al paragrafo ii. I provini vengono testati a seguito del processo di stagionatura e ad una temperatura e UR ambientale (T~ 20°C; UR ~ 20%).

Procedimento:

La misurazione avviene stabilendo la condizione di flusso termico stazionario uni-direzionale, attraverso un campione sotto forma di lastra con facce piane e parallele ovvero la stessa condizioni che si avrebbe nel caso di una lastra piana indefinita con superfici esterne isoterme a temperature diverse.

Il provino viene posto all'interno di un perimetro composto da un materiale isolante (lana di roccia) e tra un pacchetto di strati differenti composti da una piastra calda e una fredda, termo flussimetri, termocoppie, provino di riferimento e strati isolanti.

Figura 13: Sistema di misurazione e bagni termostatici

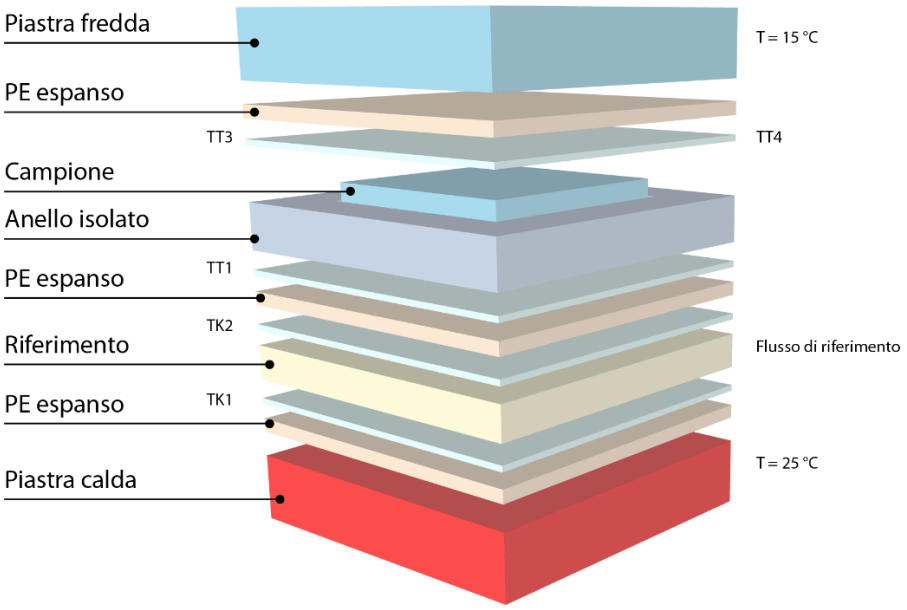


Figura 14: Schema compositivo degli strati del termoflussimetro utilizzato

Si effettuano i seguenti passaggi:

1. La piastra fredda si porta a temperatura T= 15°C grazie ad un bagno termostatico dedicato;

2. La piastra calda si porta a temperatura T= 25°C grazie ad un bagno termostatico dedicato;

3. Raggiunto il regime stazionario, il sistema di acquisizione misura il ΔT tra la piastra calda e la piastra fredda;

4. Si confronta il flusso passante per il provino di riferimento noto e il flusso passante per il campione;

5. Trascorse circa 24h il flusso inferiore e quello superiore si stabilizzano ed attraverso il software *Labview* è possibile ottenere in automatico il valore della λ.

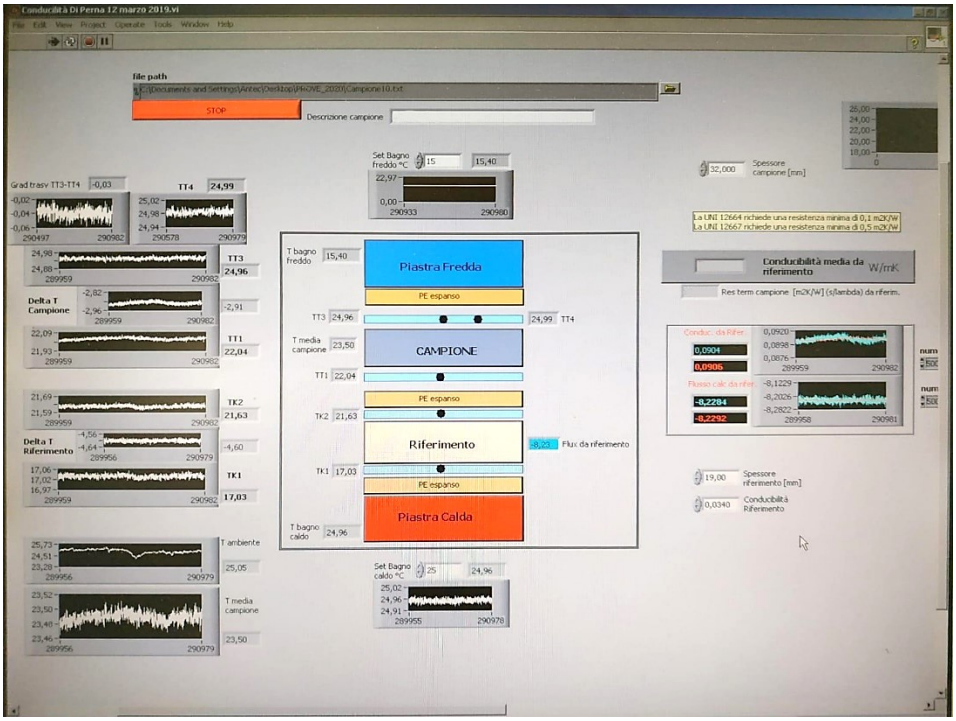


Figura 15: Software di gestione

Il valore della conducibilità termica λ [W/mK] si viene dedotto in maniera automatica dall'equazione inversa di Fourier:

$$q = \frac{\Delta T}{\frac{x}{\lambda}} \quad [W]$$

Dove:

- q è il flusso di calore passante attraverso il provino;
- ΔT è la differenza di temperatura tra le due piastre;
- x è lo spessore del provino in m.

Una volta ottenuta la λ è possibile calcolare la resistenza termica essendo noto lo spessore del campione esaminato.

Criteri di valutazione

- Più il valore della λ risulta essere basso e più il campione è performante dal punto di vista dell'isolamento termico;

- A parità di spessore campioni con una conducibilità più bassa permettono di ottenere resistenze termiche più elevate.

6. INVECCHIAMENTO ARTIFICIALE

Per valutare la durabilità degli isolanti, si è deciso di sottoporre i provini ad un invecchiamento artificiale attraverso l'esposizione di quest'ultimi ad un ambiente salino [15]. La scelta dell'invecchiamento che si basa sul coinvolgimento del cloruro di sodio nebulizzato è giustificata dalla pericolosità del sale presente nell'ambiente in esercizio, il quale instaura un processo corrosivo talune volte anche di tipo irreversibile in quanto attraverso la sua penetrazione e successiva cristallizzazione, si potrebbero creare delle microfratture interne le quali agevolano il passaggio dell'acqua e di altre sostanze all'interno dello spessore del materiale. Se si realizzassero quest'ultime condizioni, l'intonaco perderebbe le sue caratteristiche termo fisiche con la possibilità di instaurare condizioni di degrado peggiorative.

L'invecchiamento scelto consiste in cicli di umido e asciutto in cui nella prima fase, vi è la generazione di una nebbia salina per mezzo di un apposito atomizzatore, il quale nebulizza una soluzione di H_2O e NaCl. La soluzione deve avere una conducibilità di 156000 micro per poter essere idonea. Per risolvere il problema relativo al numero elevato di provini, si è creata una camera di invecchiamento su misura seguendo le specifiche della normativa UNI EN 14147:2005 "*Natural stone test methods: Determination of resistance to ageing by salt mist*" [1]. All'interno della suddetta norma, sono contenute le modalità di configurazione della camera di invecchiamento e per questo motivo è stato possibile ricrearne una rispettando i parametri di controllo normati.

L'invecchiamento risulta essere necessario per poter valutare la durabilità degli isolanti al fine di validarne l'utilizzo e l'efficacia in opera. La valutazione e le considerazioni sui provini vengono fatte in due modalità:

1. Ripetendo le prove a T=0 (confronto pre e post invecchiamento)

2. Ispezione visiva e cromatica della superficie deteriorata dei provini a seguito dell'invecchiamento

6.1. CAMERA NEBBIA SALINA

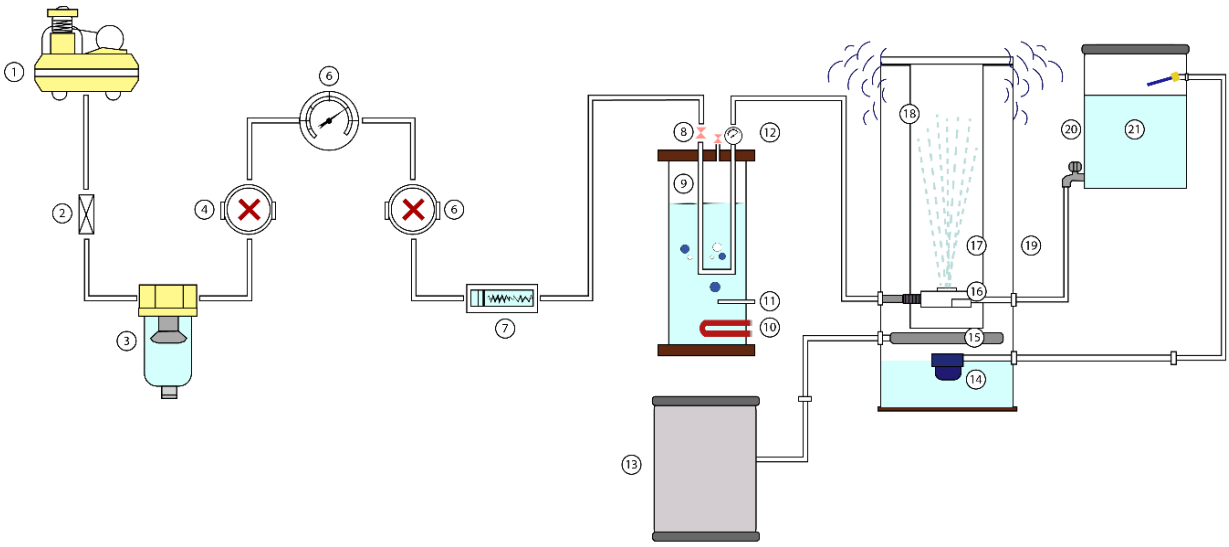
La normativa UNI EN 14147:2005, predispone specifici e dettagliati requisiti per poter validare correttamente la camera da utilizzare tra cui il mantenimento della temperatura interna di (35±5)°C per tutto il funzionamento e il numero di ore per ogni fase del ciclo. Vengono predisposte anche delle prescrizioni relative alla soluzione di cloruro di sodio e sulla capacità della camera di produrre nebbia salina. La prova dura 30 giorni con cicli alternati composti da 4 ore di nebbia salina e 8 ore di essiccazione, quindi in un giorno si effettuano 2 cicli completi per un totale di 720 minuti di funzionamento (240 minuti di ambiente salino e 480 minuti di essiccazione). Con il termine essiccazione si intende quella fase in cui l'atomizzatore non nebulizza la soluzione salina e quindi non vi è la creazione della nebbia. La prova è costituita da 60 cicli.

6.1.1. Strumenti e materiali utilizzati

- Camera in grado di eseguire cicli alternati di atmosfera di nebbia salina ed essiccazione alla temperatura di (35 ± 5) °C;
- Sistema per spruzzare la soluzione salina nella camera, che include ugelli di nebulizzazione (atomizzatore) che non spruzzino direttamente sui provini;
- Due o più collettori di nebbia dotati di un'area di raccolta orizzontale di circa 8000 mm^2: in questo particolare studio sono stati impiegati imbuti di diametro 100 mm con gambo inserito in beute graduate;
- Radiatore in alluminio collegato ad un bagno termostatico in grado di mantenere la temperatura all'interno della camera;
- Serbatoio esterno contenente la soluzione salina;
- Piastre deflettrici per evitare di spruzzare direttamente sui provini;
- Conduttivimetro, in grado di misurare la conducibilità della soluzione salina;
- Sonda elettrica, in grado di misurare temperatura e umidità relativa all'interno della camera;

- Cloruro di sodio con grado di purezza non minore del 95%;
- Soluzione di cloruro di sodio avente una concentrazione di 100 g/L;
- Sistema a tempo autonomo per scandire i cicli alternati;
- Pompa di sentina e sistema di connessioni in PVC per mettere in comunicazione l'impianto;
- Sistema di compressore ad aria compressa.

Di seguito si riporta lo schema per la messa a punto dell'impianto realizzato e convalidato.



LEGEND:

(1) Compressed Air	(4) First stage Pressure Regulator	(7) Reflux Valve	(10) Heater
(2) Pressure Safety System	(5) Pressure Gaunge	(8) Air in-Take	(11) Temperature Sensor
(3) Air Filter	(6) Second stage Pressure Regulator	(9) Humidity Tube	(12) Pressure Gauge
(13) Thermostatic Bath	(16) Atomizing Device	(19) Salt Spray Chamber	
(14) Bilge Pump	(17) Specimen Protection	(20) Tank	
(15) Radiator	(18) Salt Spray (Fog)	(21) Salt Solution	

Figura 16: Schema dell'impianto relativo al funzionamento della camera di invecchiamento

Figura 17: Radiatore in alluminio

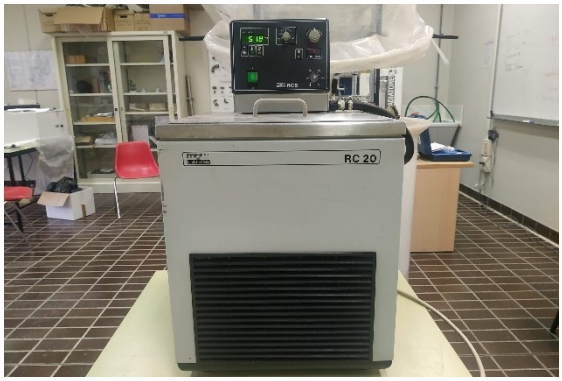


Figura 18: Bagno termostatico

.

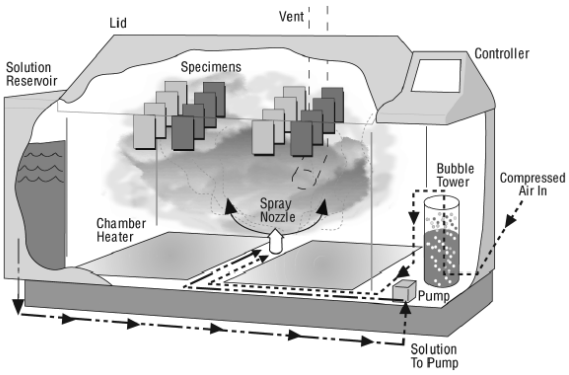
.

Figura 19: Conduttivimetro

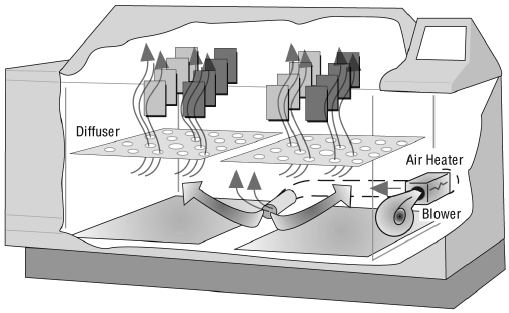
Figura 20: Sonda per temperatura e UR

6.1.2. Principio di realizzazione della camera salina

Per poter realizzare una camera salina che potesse soddisfare i requisiti della normativa, si è compreso quale fosse il suo funzionamento e quali fossero i componenti principali che la compongono. In commercio si possono trovare cabine che hanno diverse funzioni come quella della *Q-Lab Corporation* che permette di ricreare diversi cicli, come quello con e senza nebbia.



Chamber performing the fog function



Chamber showing the dry-off environment

Figura 21: Schematizzazione di alcuni cicli realizzabili con una salt chamber della Q-Lab Corporation.

Analizzando attentamente il funzionamento, si deduce che è un sistema combinato ad acqua e ad aria compressa le cui componenti principali sono esemplificati nella Figure . La soluzione viene immessa nel sistema mediante un serbatoio con capienza di 100 litri il quale contiene la soluzione salina controllata. La soluzione viene convogliata all'atomizzatore (*spray nozzle*) all'interno della camera stagna il cui funzionamento è scandito da un temporizzatore. L'aria, invece, dal compressore passa a un gorgogliatore, il quale risulta essere un sistema che ha il compito di umidificarla e scaldarla. Grazie a questo passaggio si riesce ad ottenere un effetto nebbia con più vapore senza variare notevolmente la temperatura interna della camera che deve mantenersi a (35±5)°C.

La *spray tower* è il luogo dove questi due sistemi si uniscono e mixano. La soluzione in eccesso si deposita sul fondo durante la prova e viene poi drenata in un secondo momento. Sono presenti due collettori, uno posto vicino alla tower e uno più lontano che fungono da verificatori: raccolgono la soluzione durante la prova e, misurandone la quantità e la conducibilità elettrica, è possibile stabilire l'efficacia della prova. La temperatura è controllata durante tutto il processo e il pannello di controllo si possono impostare le tempistiche dei cicli.

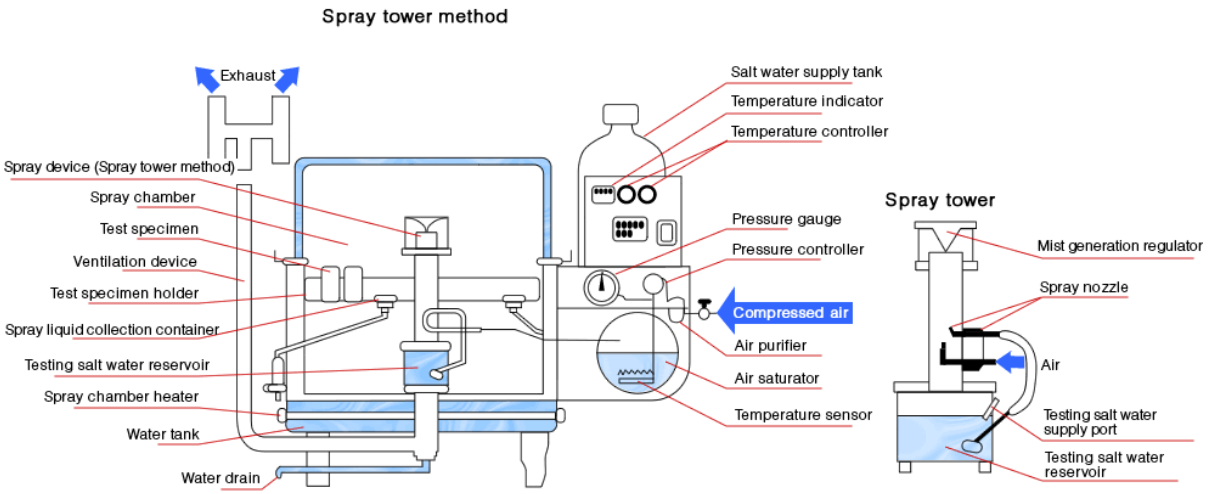


Figure 22: Neutral salt water spray test methods [https://www.misumi-techcentral.com/]

Particolare attenzione è stata posta al *salt spray nozzle* (definito anche come atomizzatore), elemento focale della camera che comunemente è realizzato in vetro. È caratterizzato da due cilindri, perpendicolari tra loro, di diametri tali da avere un'opportuna nebbia in grado di non bagnare i provini anche con l'impiego di poca pressione del compressore.

6.1.3. Costruzione della camera

Per la realizzazione dell'involucro esterno della camera di nebbia salina, si è impiegato un contenitore rettangolare in PVC avente anche lo scopo di essere un serbatoio di raccolta per la soluzione in eccesso e per quella che condensa all'interno della struttura. All'interno è stata posta una struttura parallelepipeda in acciaio nella quale si sono inseriti scaffali posti ad un interasse tale da poter posizionare in maniera corretta i provini all'interno della camera. Nella parte sottostante della scaffalatura, si è inserito un radiatore in alluminio con lo scopo di mantenere una temperatura di (35 ± 5) °C. Per poter proteggere i provini dal getto diretto dello *spray nozzle*, si è inserito un mezzo tubo in PVC opportunamente sagomato collegato saldamente alla struttura in acciaio per mezzo di fascette. In questo medo, in conformità con la normativa, la nebbia prodotta dal sistema non bagna direttamente i provini ma si ottiene un ambiente salino e si ricrea l'effetto dello *spray tower.* Per rendere stagna la camera, si è creato un coperchio a cui viene collegato un telo trasparente di plastica.

Figura 23: Camera con provini

Figura 24: Camera sigillata con telo in pvc

Successivamente è stato costruito uno *spray nozzle* costituito da un elemento metallico di base triangolare dove si incontrano il flusso d'aria compressa e soluzione salina, in riferimento allo schema. I condotti che portano i due composti presentano delle strozzature in modo che l'azione combinata possa produrre l'effetto nebbia desiderato. Tale sistema è stato necessario anche al fine di far lavorare l'impianto a pressioni idonee ottenendo il risultato atteso e normato. La pressione di esercizio risulta essere di 0,7 bar.

Figura 25: Salt spray nozzle realizzato con componenti metalliche

Per raffinare il funzionamento del sistema e rispettare i requisiti da normativa, si è realizzato un gorgogliatore per umidificare e scaldare l'aria in entrata. Il sistema del gorgogliatore è composto da piccolo serbatoio stagno (elemento in PVC cilindrico DN 200) avente due basi costituite da coperchi. Quest'ultimi sono composti da sezioni circolari aventi dei fori i quali sono stati fissati per mezzo di viti filettate, dadi e rondelle a successive flange. Per rendere solidale il collegamento tra i coperchi e il cilindro del serbatoio viene data una mano di primer e di colla Tangit, garantendo una chiusura stagna ed ermetica del sistema.

Figura 26: Serbatoi cilindrico in PVC

Figura 27: Colla Tangit

Figura 28: Flange di chiusura

Figura 29: Viti autofilettante

All'interno del sistema appena descritto, viene inserita una resistenza di rame a forma di bobina la quale ha il compito di scaldare l'acqua all'interno del gorgogliatore e portarla a 35°C in modo da non avere dei gap termici che potrebbero abbassare la temperatura all'interno della camera di nebbia salina. Sulla flangia superiore sono stati realizzati 4 fori con opportune filettature: due sono la mandata e il ritorno dell'acqua che passa nella resistenza a cui è collegato il bagno termostatico e due sono la mandata e il ritorno dell'aria compressa. Al tubo di ritorno del gorgogliatore è stato inserito un filtro, per evitare che ipotetiche particelle arrivassero allo *salt spray nozzle.* Si è dunque assemblato l'intero elemento collegando gli estremi della bobina al coperchio, inserendola nel contenitore e sigillando il tutto. Sono stati poi collegati i tubi dell'acqua secondo il seguente circuito:

1. Partenza: bagno termostatico;
2. Passaggio all'interno della resistenza a forma di bobina nel gorgogliatore;
3. Passaggio all'interno del radiatore in alluminio posto nella camera di nebbia salina;
4. Ritorno al bagno termostatico;
5. Partenza aria compressa dal compressore;
6. Passaggio per il gorgogliatore dove si umidifica e riscalda l'aria;

7. Arrivo della soluzione salina e dell'aria umidificata e calda allo *spray nozzle*.

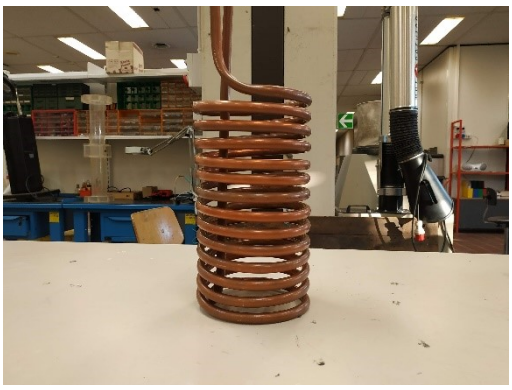


Figura 30: Resistenza in rame a forma di bobina

Figura 31: Fori per realizzazione circuito

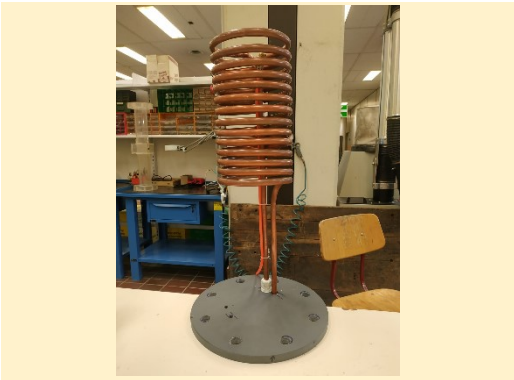


Figura 32: Collegamenti bobina

Figura 33: Connessioni al bagno termico

Per poter immettere all'interno del circuito la soluzione salina opportunamente preparata, si è impiegato un serbatoio in PVC nero da 100 L. Tale capienza è stata dimensionata in base al tempo di funzionamento del sistema in autonomia. Sulla parete perimetrale del serbatoio sono stati realizzati due fori posti in posizione opposta:

- Mandata: in basso abbiamo il foro di immissione della soluzione salina attraverso un sistema di tubazioni collegate ad un'elettrovalvola che arriva poi allo *spray nozzle* all'interno della camera di nebbia salina;

- Ritorno: in alto abbiamo il foro di emissioni del residuo di soluzione proveniente dalla camera di nebbia salina all'interno del serbatoio di partenza grazie all'ausilio di una pompa di sentina con funzionamento programmato (portata di 15 L/min e con tempo di esercizio: 4 minuti).

Per rendere autonomo tutto il circuito, si sono inseriti dei temporizzatori in grado di scandire correttamente i cicli di esercizio di tutto il sistema. Si sono anche inserite due elettrovalvole collocate rispettivamente alle mandate di aria compressa e soluzione salina.

All'interno della camera di nebbia salina è stata inserita una pompa di sentina precedentemente annunciata. Quest'ultima ha il compito, una volta al giorno di svuotare la camera di nebbia salina e riempire il serbatoio contenente la soluzione al fine di evitare due problematiche:

1. Ristagno e accumulo della soluzione all'interno della camera di nebbia salina;

2. Recupero di tale soluzione e mescolazione della soluzione salina all'interno del serbatoio nero evitando il possibile deposito di particelle sul fondo.

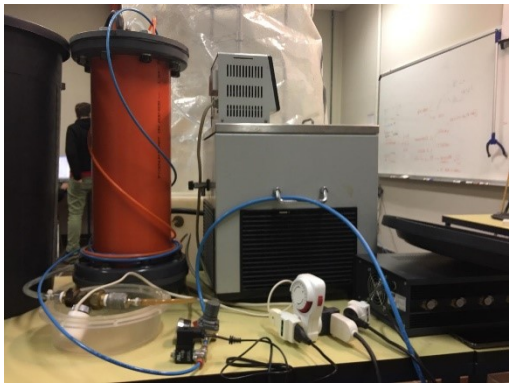


Figura 34: Temporizzatori ed elettrovalvole

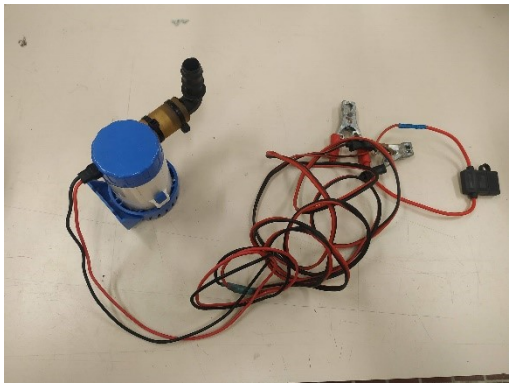


Figura 35: Pompa di sentina

6.2. PROCEDIMENTO DELLA PROVA: cicli di invecchiamento

La soluzione salina è stata preparata utilizzando cloruro di sodio con grado di purezza non minore del 95% e acqua avente una conduttività minore uguale a 20 µS/cm. Per le dosi per la soluzione, si sono sciolti (10±1) parti in massa di cloruro di sodio in 90 parti di acqua per ottenere una concertazione di (100±10) g/L come da normativa [1].

Posizionati i provini sui supporti , si sono esposti alla nebbia salina per 4 h ± 15 min e si è poi disattivato il sistema di spruzzatura salina, essiccando i provini nella camera, per 8 h ± 15 min. Ciò costituisce un ciclo durante il quale la temperatura nella camera si è mantenuta costante a (35 ± 5) °C [15][16].

Descrizione di un ciclo		**Ore totali di funzionamento**	
Temperatura della camera mantenuta a (35±5) °C		**Tempi**	***tot***
Nebbia salina	4 h ± 15 min	4x60= 240 h	**720 h**
Spegnere il sistema di spruzzo		8x60= 480 h	
Essicazione	8 h ± 15 min		

La prova si è costituita da 60 cicli per un totale di 30 giorni. Una volta a settimana i provini sono stati sottoposti ad un'indagine visiva per verificare l'avanzamento della prova.

6.3. PROVINI

Al processo di invecchiamento artificiale, sono state sottoposte tutte le tipologie di provini precedentemente descritti e identificati al paragrafo b.

Quindi sono stati inseriti nella camera di nebbia salina tutti i provini che corrispondono alle descrizioni campioni testati a T=0 al fine di poter effettuare il giusto confronto tra le analisi e le prove pre e post invecchiamento. Si sono inseriti un totale di 60 campioni nella camera, suddivisi come segue:

- N. 24 provini circolari con diametro di 16 cm per la prova di permeabilità al vapore;

- N. 24 provini rettangolari con lato di 20 cm per la prova di assorbimento d'acqua;
- N. 4 provini rettangolari con lato di 30 cm per la prova di aderenza al supporto
- N. 8 provini rettangolari con lato di 30 cm per la prova di conducibilità.

Si sono posizionati all'interno della camera sulle relative scaffalature precedentemente inserite in condizioni tali da essere sottoposti solo alla nebbia salina, evitando zone di spruzzatura diretta o di gocciolamento, e da non toccarsi direttamente.

A seguito dell'invecchiamento i provini vengono inseriti nel forno ventilato ad una temperatura di (35±5)°C prima di effettuare le prove post invecchiamento.

7. RISULTATI TEMPO T=0

7.1. Analisi per la caratterizzazione mediante microscopia elettronica a scansione (SEM)

Lo scopo della prova è l'analisi della topografia e della microstruttura della superficie del campione attraverso una scansione in scala di grigi e bidimensionale. L'indagine è di tipo non distruttiva. Per ogni campione sono stati realizzati diversi ingrandimento attraverso il Vega, in base al tipo di materiale, in modo da avere una panoramica generale e poi un ingrandimento maggiore per cogliere i dettagli.

Risultati

- **Sughero**

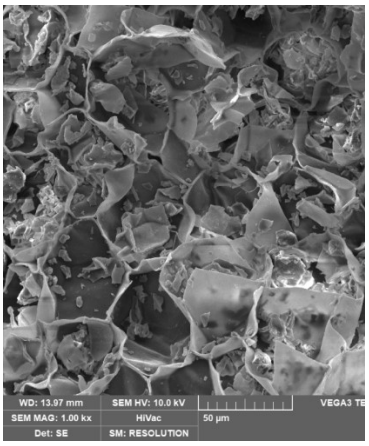


Figura 36: Sughero x 1000

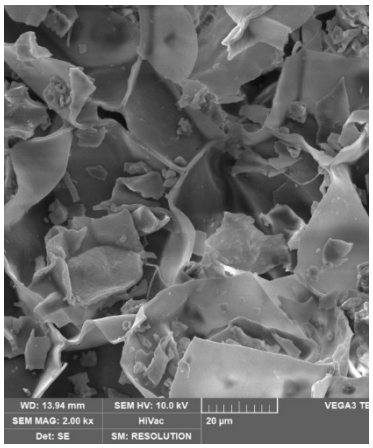


Figura 37: Sughero x 2000

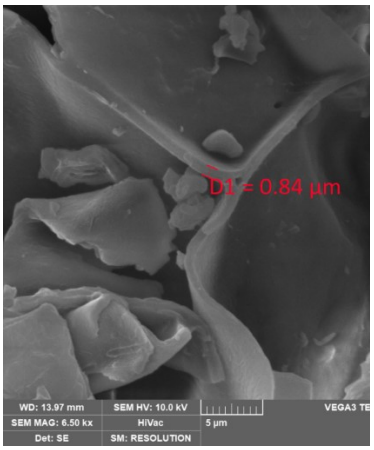


Figura 38: Sughero x 6500

- **Fibra di Legno**

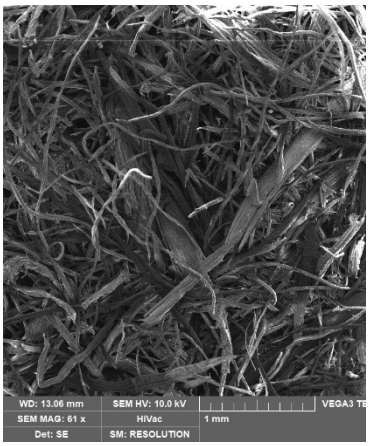


Figura 39: Fibra di Legno x 60

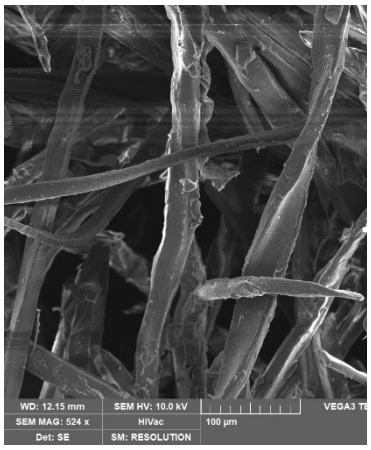


Figura 40: Fibra di Legno x 500

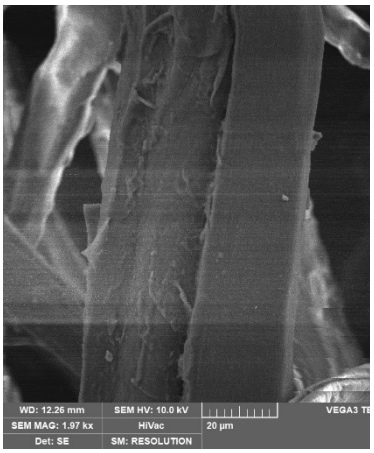
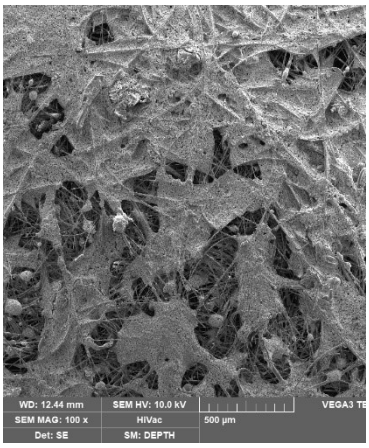
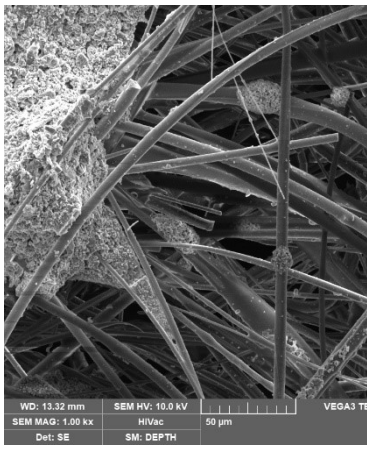


Figura 41: Fibra di Legno x 2000

- **Lana di Roccia**





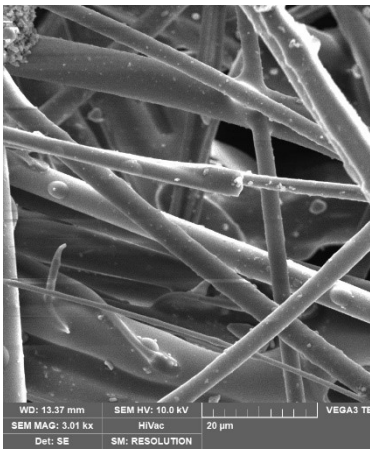
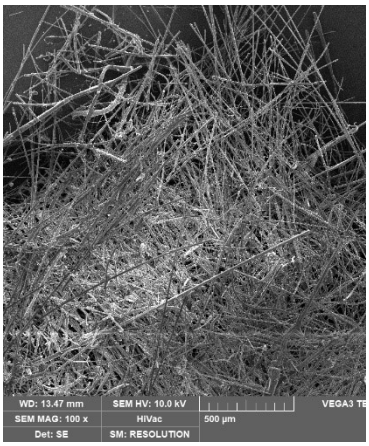
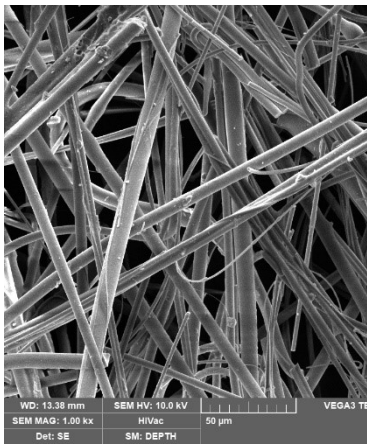


Figura 42: Lana di Roccia x 100 *Figura 43: Lana di Roccia x 1000* *Figura 44: Lana di Roccia x 3000*

- **Lana di Vetro**





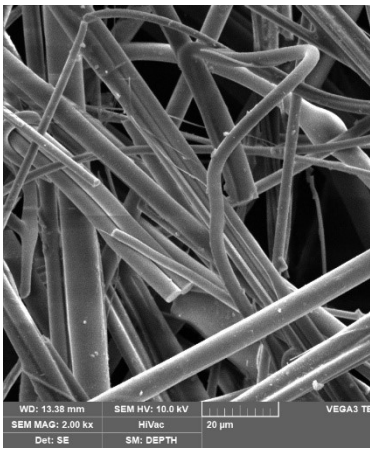


Figura 45: Lana di Vetro x 100 *Figura 46: Lana di Vetro x 1000* *Figura 47: Lana di Vetro x 2000*

- **Finitura**

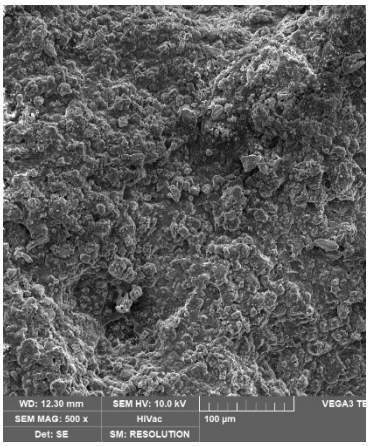


Figura 48: Finitura x 500

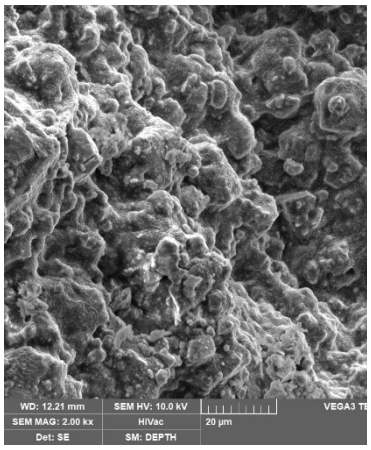


Figura 49: Finitura x 2000

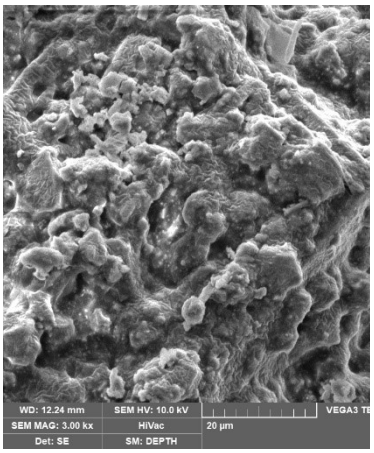


Figura 50: Finitura x 3000

Considerazioni

Il primo campione riguarda il Sughero, un materiale costituito da una struttura ripetitiva a nido d'ape, con pareti di spessore nell'arco del micron, nette e ben definite; dei frammenti sono depositati all'interno delle cavità in maniera diffusa.

Il secondo campione riguarda la Fibra di Legno, costituita da filamenti intrecciati in maniera caotica, con una superficie costituita da rigonfiamenti ed asperità.

Il terzo campione è la Lana di Roccia sul quale si trova uno strato superficiale di silicati che ne agevola l'aggrappaggio dell'intonaco; i filamenti sono ben definiti, netti con una superficie pressoché liscia, si nota in questo caso una struttura generale costituita da un più ampio spazio vuoto tra le fibre, a differenza della Fibra di Legno.

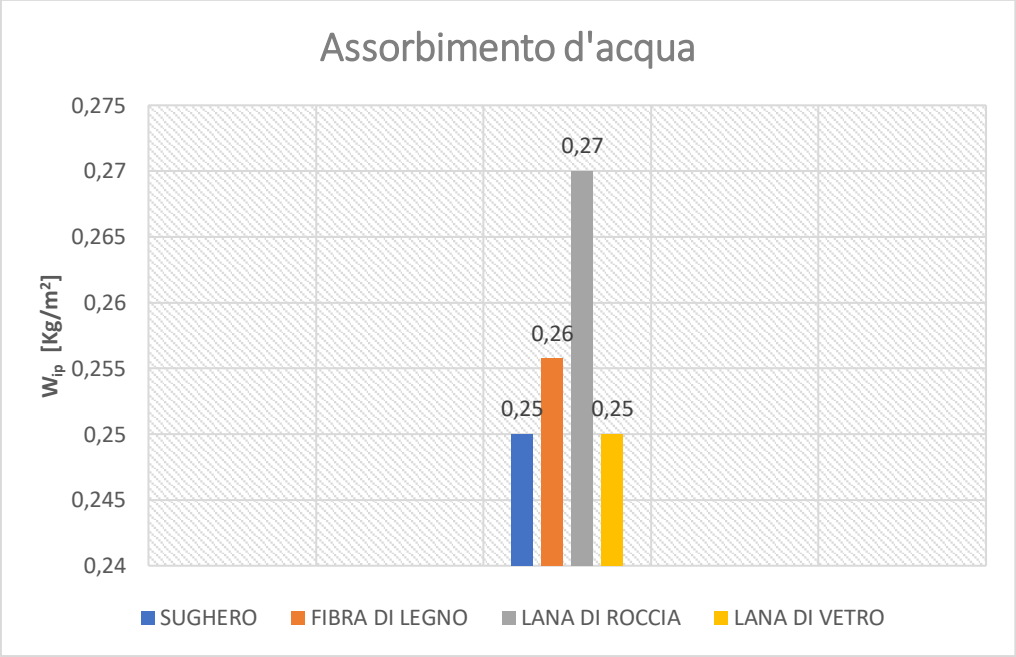
Il quarto campione è la Lana di Vetro, molto simile alla precedente con filamenti ben definiti con una struttura ancora più liscia; da notare anche in questo caso molti spazi vuoti tra i vari filamenti.

L'ultimo campione riguarda la Finitura superficiale che ricopre ogni isolante ed anche il rasante. È una struttura molto compatta ed uniforme.

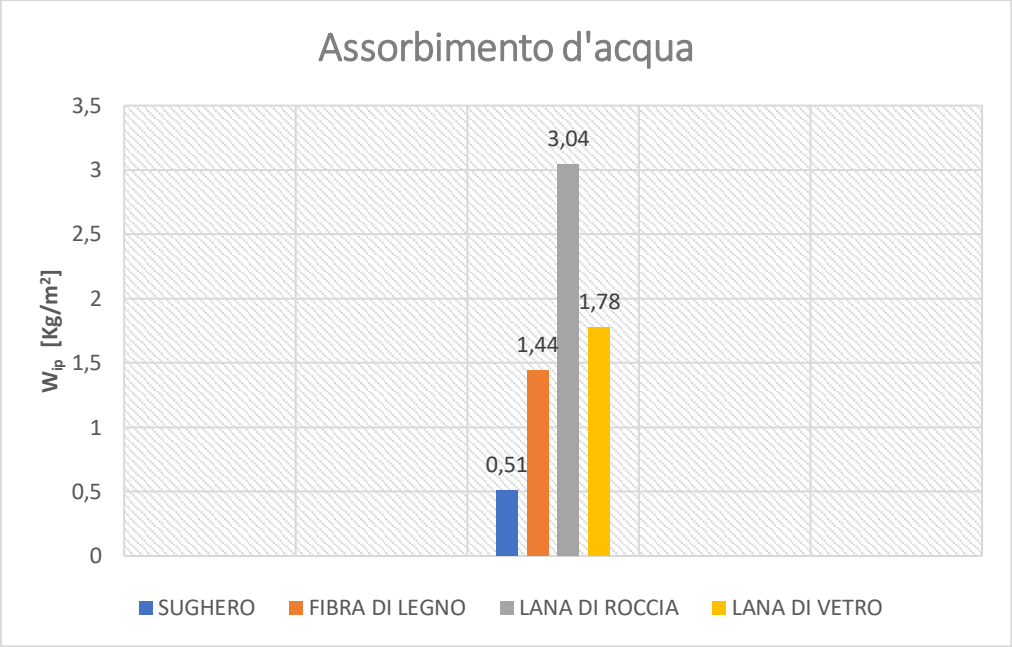
7.2. Determinazione del coefficiente di assorbimento d'acqua

Lo scopo della prova è la determinazione del valore del coefficiente di assorbimento d'acqua importante per ipotizzare il comportamento in situ dei materiali. La prova si svolte immergendo i campioni sino a 10 mm per un totale di 28 giorni. Vengono effettuate pesate prima e dopo la prova.

Risultati sistema Etics



Risultati isolanti



Considerazioni

Tutti i campioni con l'intonaco hanno un valore del coefficiente d'assorbimento molto simile tra di loro, dovuto al fatto che sono tutti rivestiti dello stesso rasante e finitura superficiale, la quale ha un basso coefficiente.

Per i soli isolanti invece il Sughero ha il più basso coefficiente in quanto ha una microstruttura costituita da celle chiuse e ravvicinate, mentre la Lana di Roccia e di Vetro supera tutti gli altri campioni, dovuto al fatto che la loro microstruttura è costituita da molti vuoti. Il campione di Fibra di Legno invece ha un comportamento che si pone in mezzo a tutti gli altri, dovuto al fatto che i filamenti sono più vicini tra di loro, formando meno cavità vuote.

7.3. Determinazione dell'aderenza al supporto

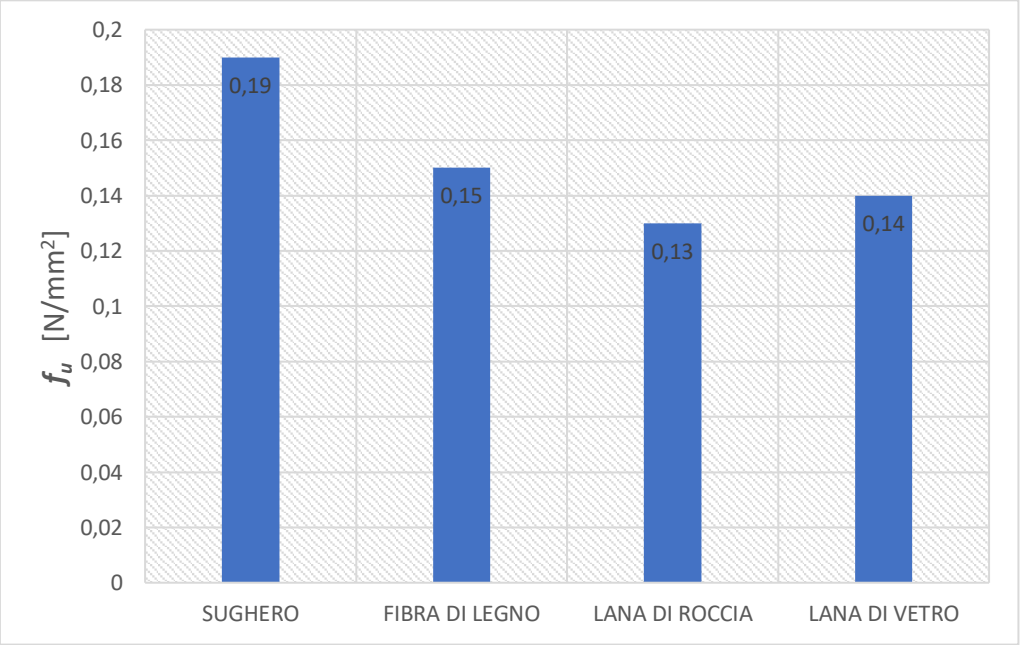
Lo scopo di tali prove è stato quello di determinare la forza di aderenza tra l'intonaco ed il supporto.

In sintesi, si è voluto:

- Osservare la variazione del valore di aderenza al supporto tra le diverse tipologie di isolante;
- Considerare la tipologia di isolante che possiede un'aderenza sufficientemente elevata.

Criteri di valutazione:

Un intonaco è di qualità meccanica accettabile se ha un legame di aderenza efficace con il supporto. La forza di adesione è il quoziente tra il carico di rottura e l'area di prova.



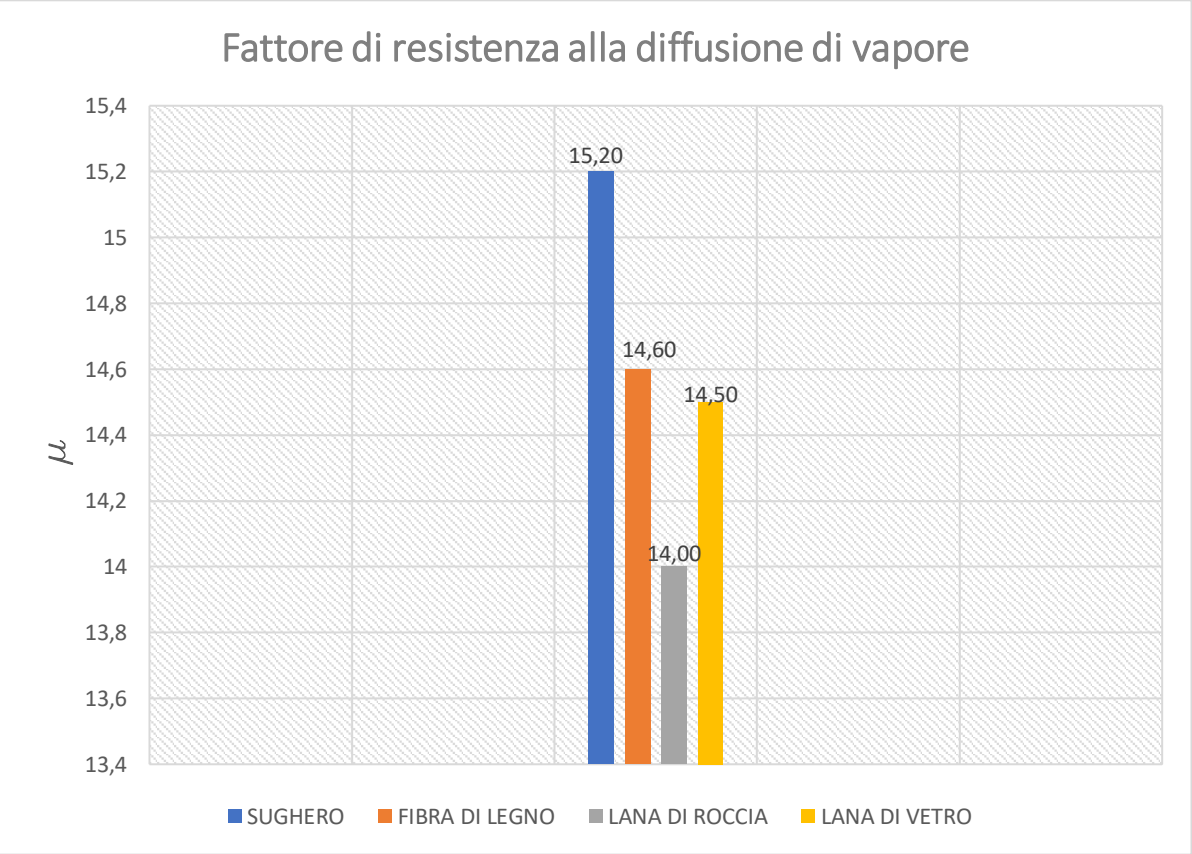
Considerazioni

Tutti i campioni hanno in linea generale dato risultati soddisfacenti in termini di forza di adesione. Tra tutti il Sughero ha una superiore forza di adesione, dovuta al fatto che la microstruttura compatta favorisce l'aggrappaggio della microstruttura dell'intonaco. Gli altri campioni, invece, hanno valori molto simili tra di loro più bassi.

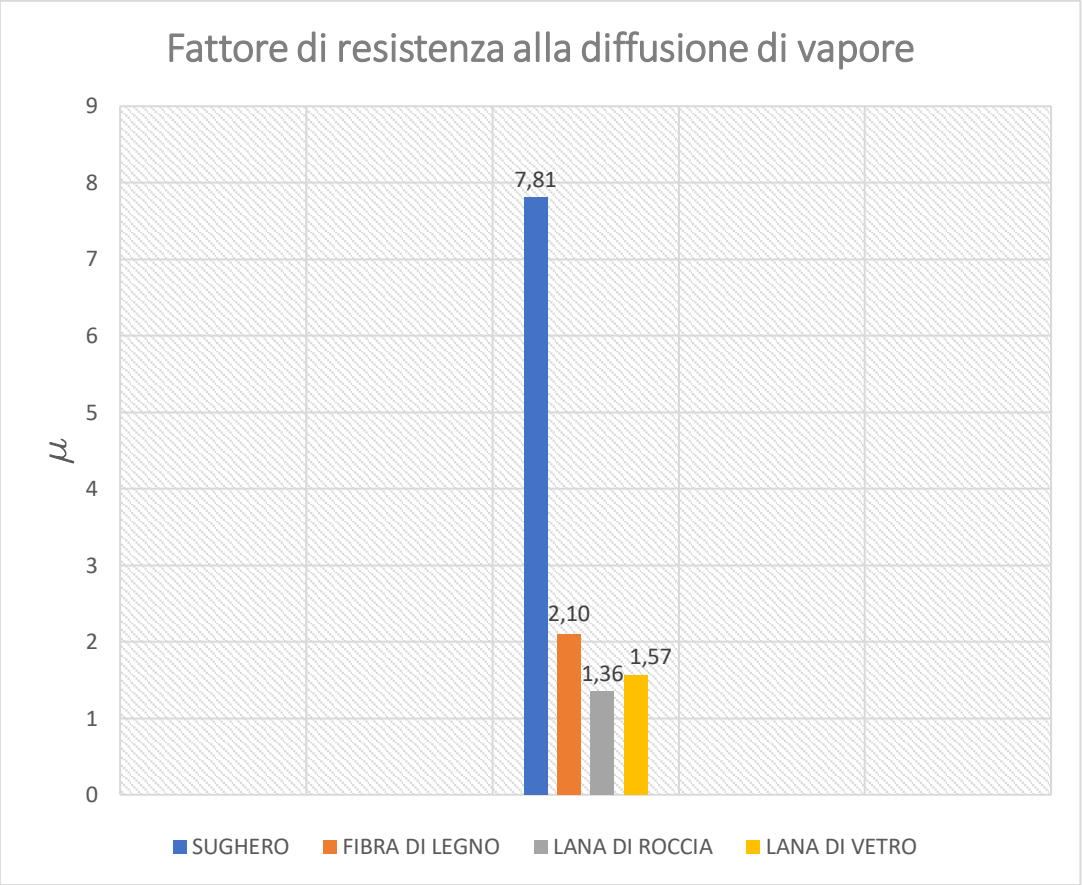
7.4. Determinazione della permeabilità al vapore d'acqua

La prova permette di determinare la permeabilità al vapore dei campioni analizzati e di conseguenza la loro resistenza al vapore μ.

Risultati sistema ETICS



Risultati isolanti



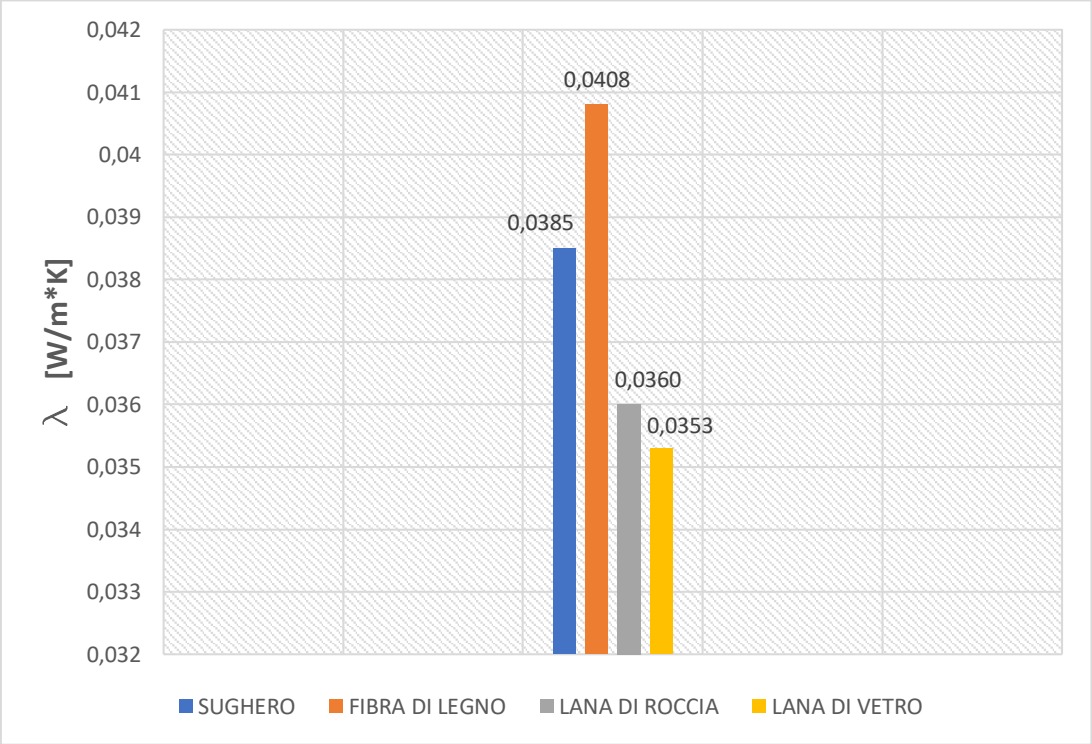
Considerazioni

Tutti i campioni risultano avere un μ≤15, quindi non oppongono un elevata resistenza al vapore consentendo di evitare possibili problemi di condensa. Il sistema ETICS risulta avere, in tutti i provini, un valore paragonabile di resistenza al vapore; mentre tra gli isolanti il sughero ha una più spiccata resistenza al passaggio di vapore. Lana di Roccia e Vetro hanno il più basso fattore μ vista la loro microstruttura formata da molti spazi vuoti; la Fibra di Legno, invece, pur avendo una basso valore lo è pur sempre maggiore delle fibre minerali.

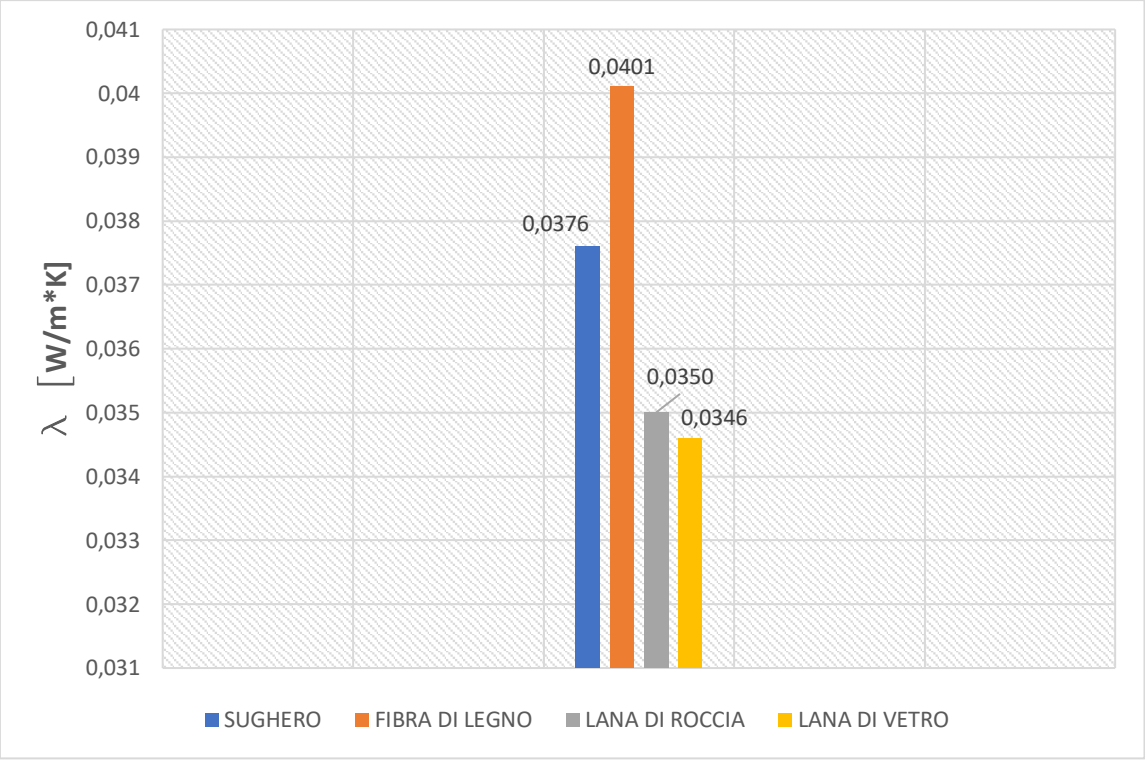
7.5. Determinazione della conducibilità termica con il metodo del termoflussimetro

Lo scopo della prova è la determinazione del valore della conducibilità termica λ degli isolanti testati. Il concetto di base del metodo si basa sulla misurazione del flusso termico medio scambiato in regime stazionario.

Risultati sistema Etics



Risultati isolanti



Considerazioni

Dai risultati emerge che le fibre minerali risultano essere più performanti dal punto di vista termico. Dividendo il valore μ per lo spessore medio del campione, possiamo ottenere la resistenza termica *R* la quale poi successivamente potrà essere utilizzata per il calcolo della trasmittanza termica *U* della parete opaca su cui verranno applicati i prodotti. Tra tutti, invece, la Fibra di Legno ha valori di conducibilità sensibilmente maggiori rispetto agli altri.

8. RISULTATI POST INVECCHIAMENTO – Aged

8.1. Analisi per la caratterizzazione mediante microscopia elettronica a scansione (SEM)

- **Sughero**

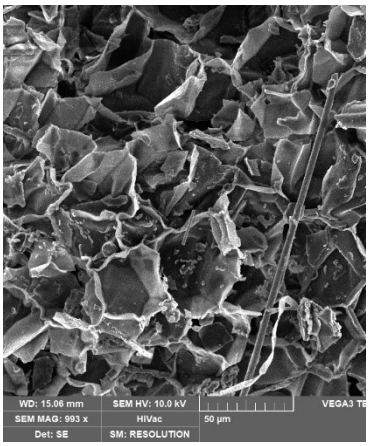


Figura 51: Sughero x 1000

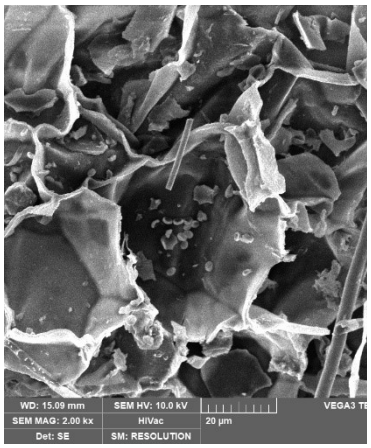


Figura 52: Sughero x 2000

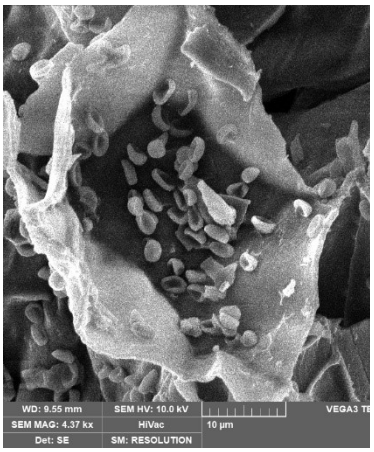


Figura 53: Sughero x 4000

- **Fibra di Legno**

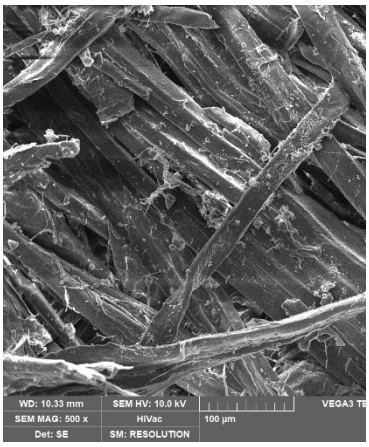


Figura 54: Fibra di Legno x 500

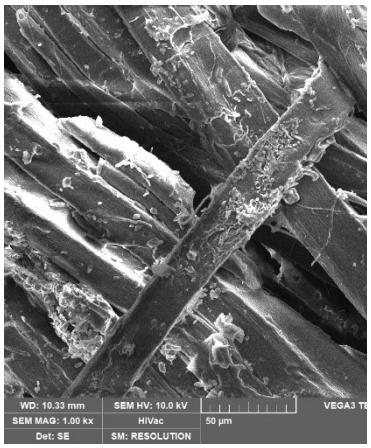


Figura 55: Fibra di Legno x 1000

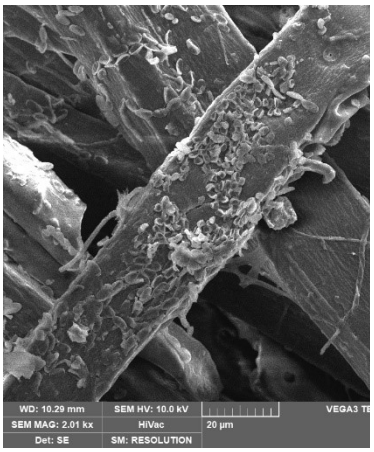
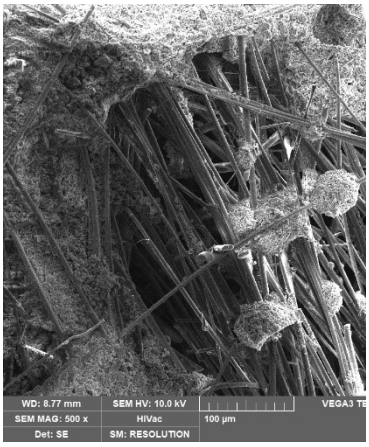
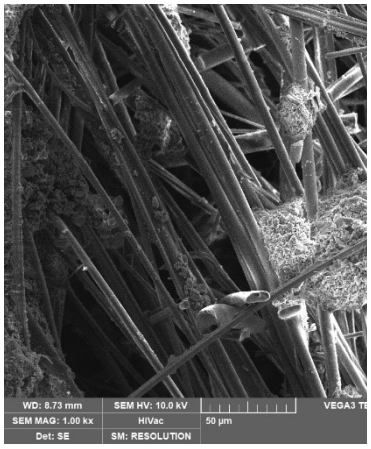


Figura 56: Fibra di Legno x 2000

- **Lana di Roccia**





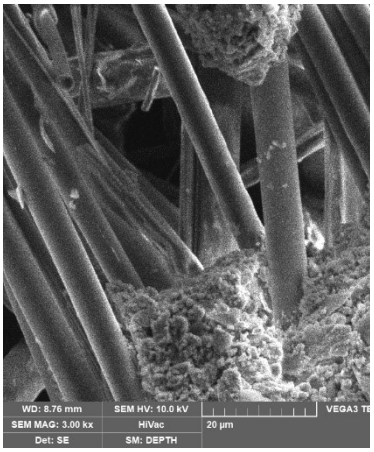
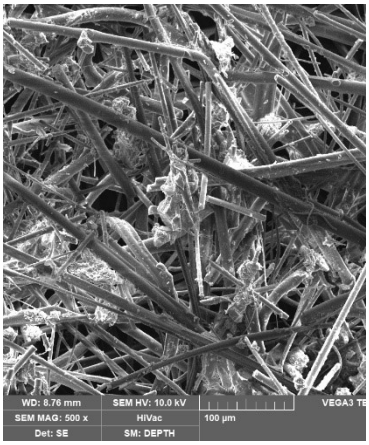


Figura 57: Lana di Roccia x 500 *Figura 58: Lana di Roccia x 1000* *Figura 59: Lana di Roccia x 3000*

Lana di Vetro



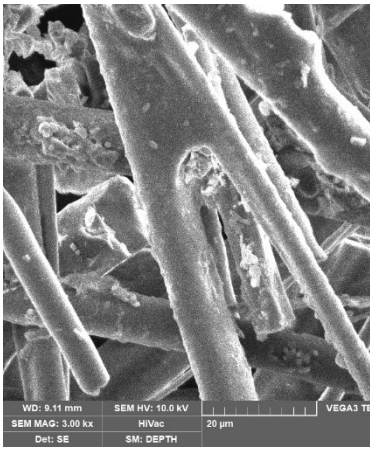


Figura 60: Lana di Vetro x 500 *Figura 61: Lana di Vetro x 1000* *Figura 62: Lana di Vetro x 3000*

- **Finitura**

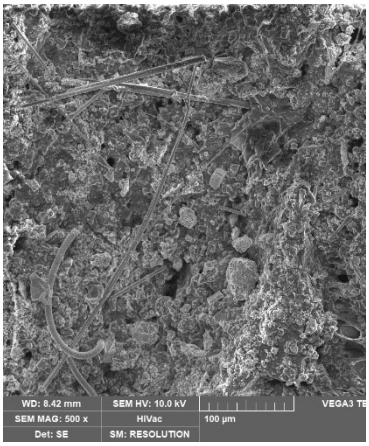


Figura 63: Finitura x 500

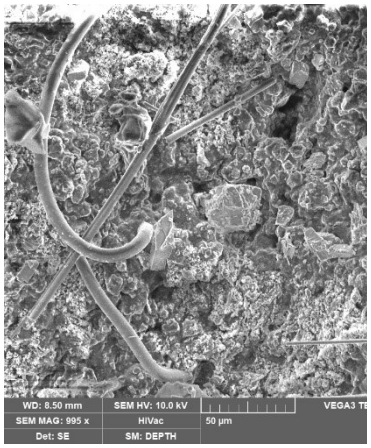


Figura 64: Finitura x 1000

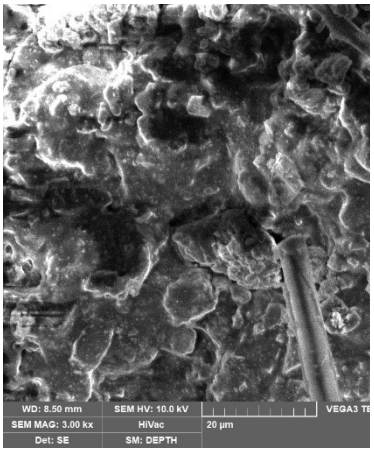


Figura 65: Finitura x 3000

Considerazioni

Nell'immagini acquisite tramite il SEM è possibile notare dei depositi dovuti dalla presenza del sale cristallizzato. La presenza dell'NaCl è confermata dall'analisi EDX in quanto sono presenti sia Na sia Cl che in precedenza non vi erano. Tuttavia, il quantitativo di NaCl dipende molto dalla zona di acquisizione del campione.

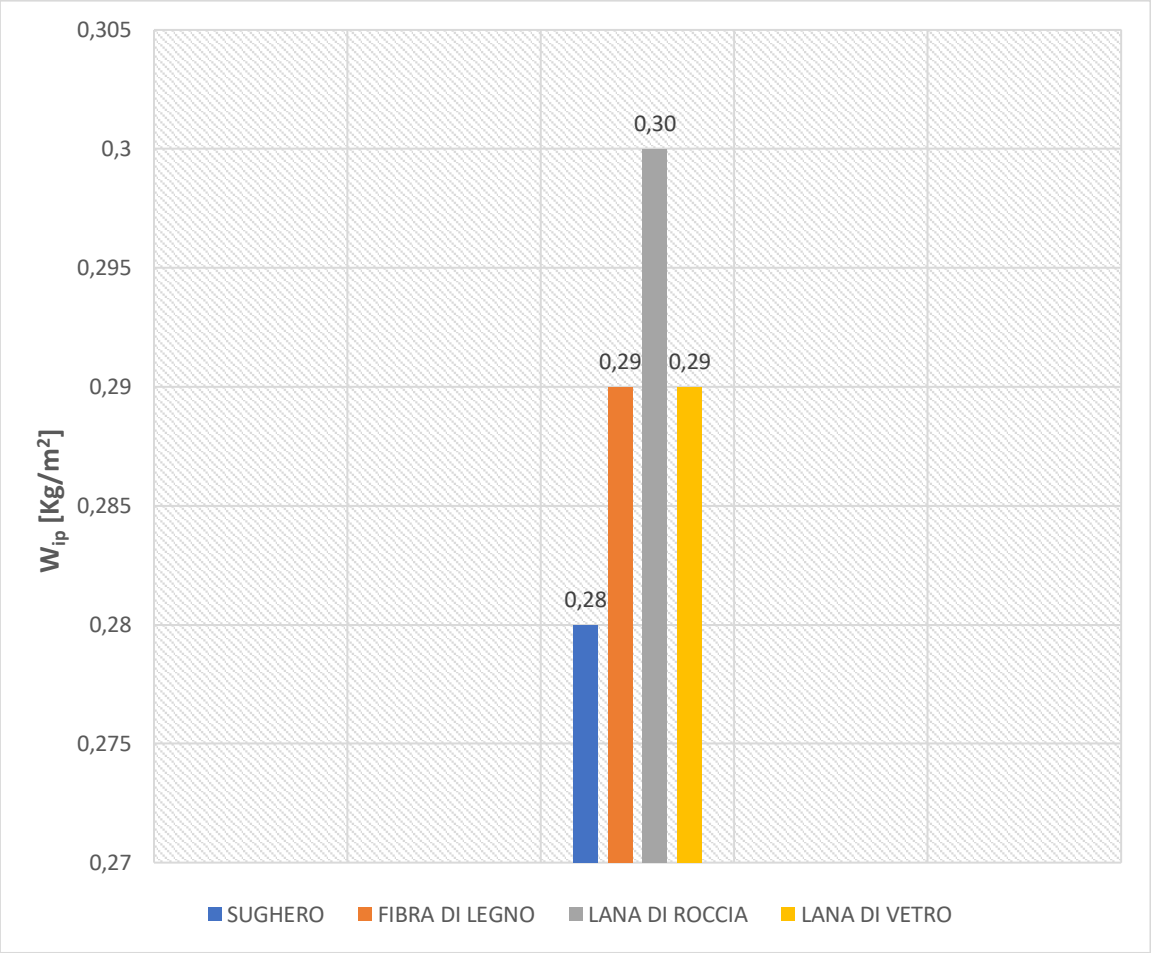
Sono presenti in quasi tutti i campioni delle spore fungine, nel Sughero e Fibra di Legno sono visibili molto bene in gran quantità, mentre negli altri due isolanti e sulla Finitura superficiale sono quasi assenti.

Si nota un leggero degrado del campione di Sughero, in particolare i bordi delle celle; molto più accentuato è quello della Fibra di Legno, sono più visibili le spore fungine ed i

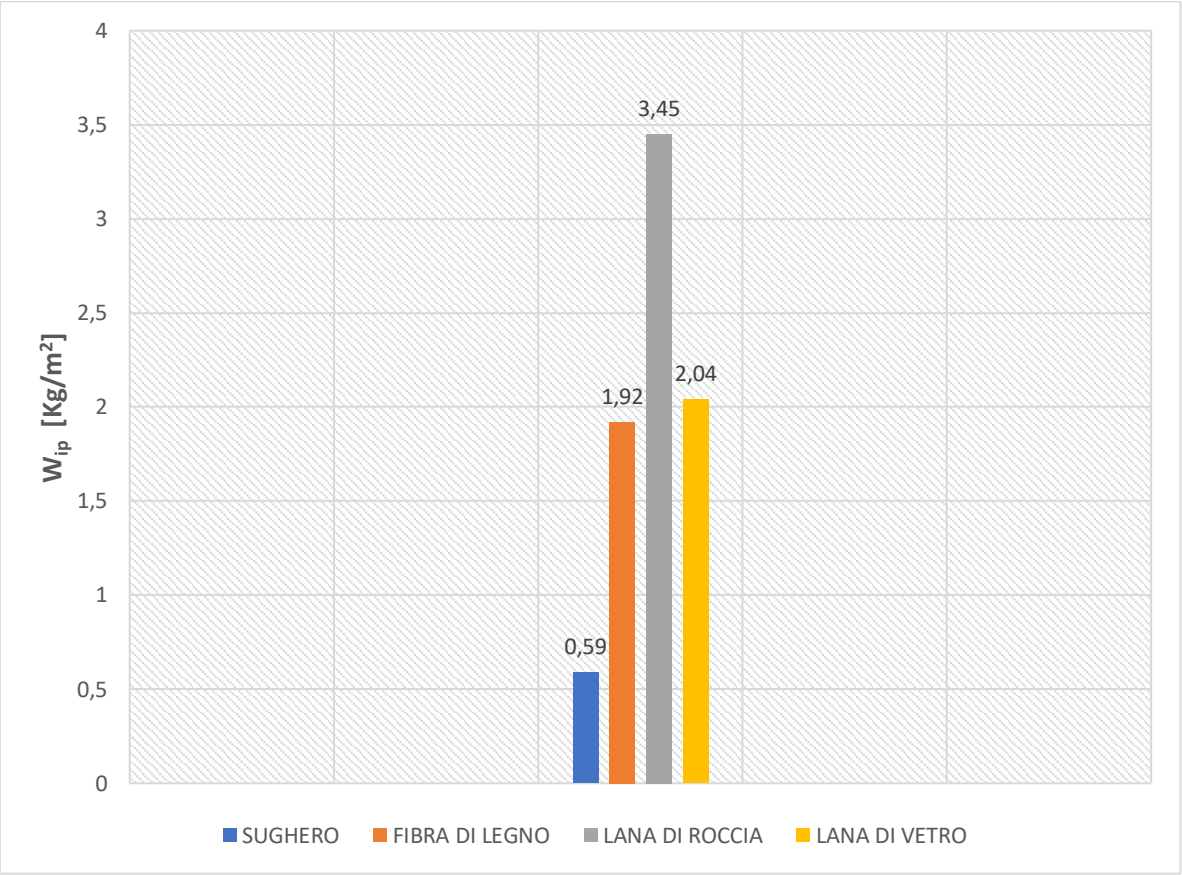
bordi delle fibre sono sfilacciati. Nelle fibre minerali è più marcata la presenza di cristalli di sale, in particolare nei filamenti in Fibra di Vetro.

8.2. Determinazione del coefficiente di assorbimento d'acqua

Risultati sistema Etics



Risultati isolanti senza intonaco

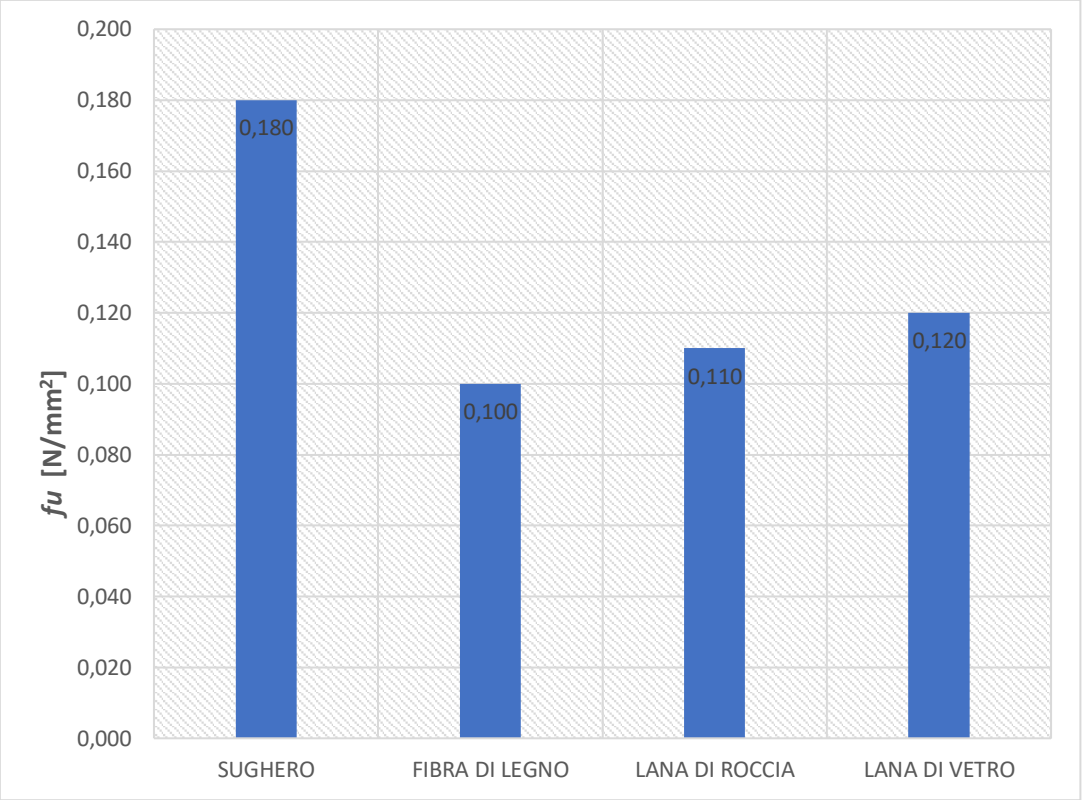


Considerazioni

I provini a seguito dell'invecchiamento artificiale cambiano la loro attitudine nell'assorbire l'acqua per capillarità.

8.3. Determinazione dell'aderenza al supporto

Risultati

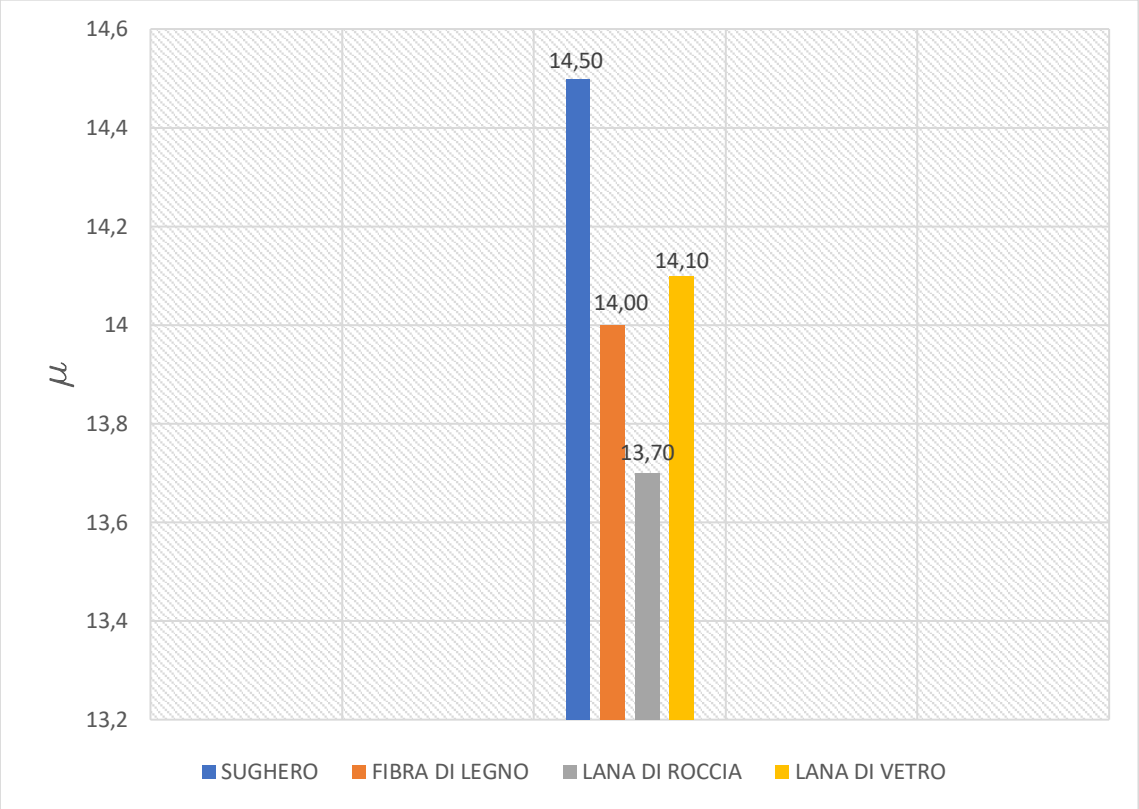


Considerazioni

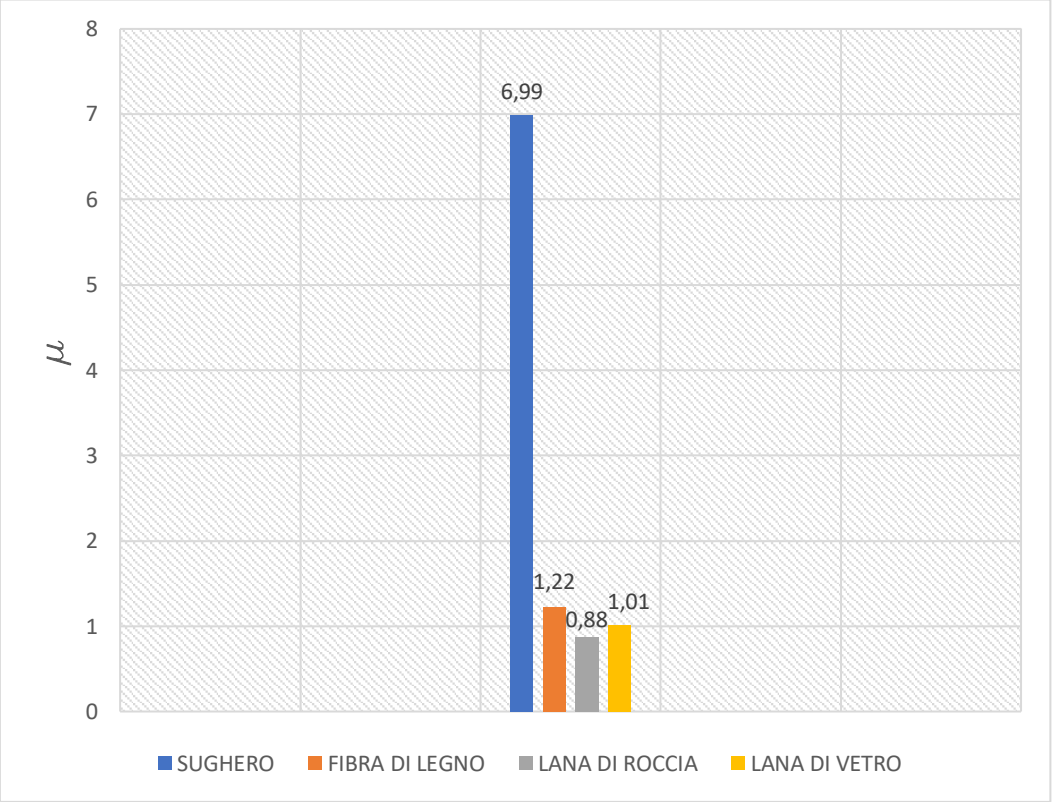
I provini di intonaco a seguito dell'invecchiamento artificiale cambiano la loro aderenza al supporto al pannello isolante.

8.4. Determinazione della permeabilità al vapore d'acqua

Risultati sistema Etics



Risultati isolanti

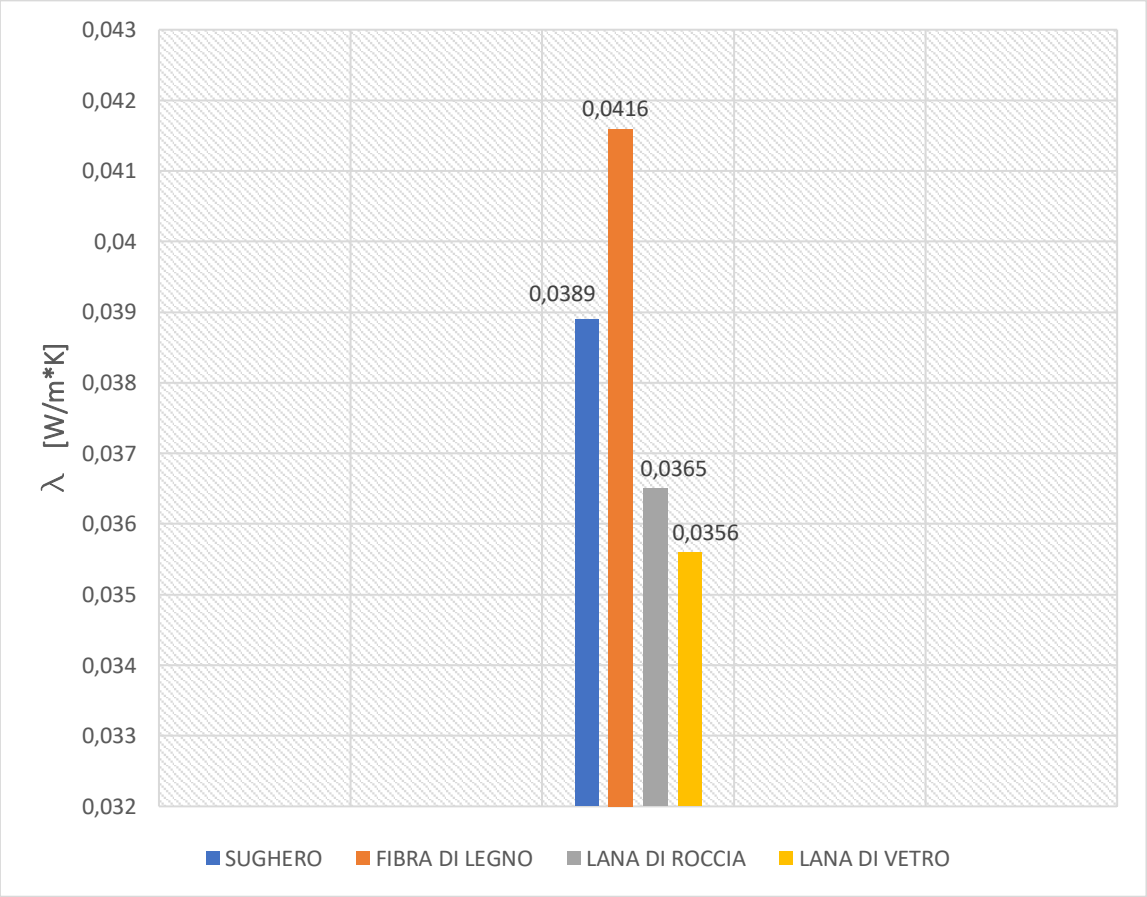


Considerazioni

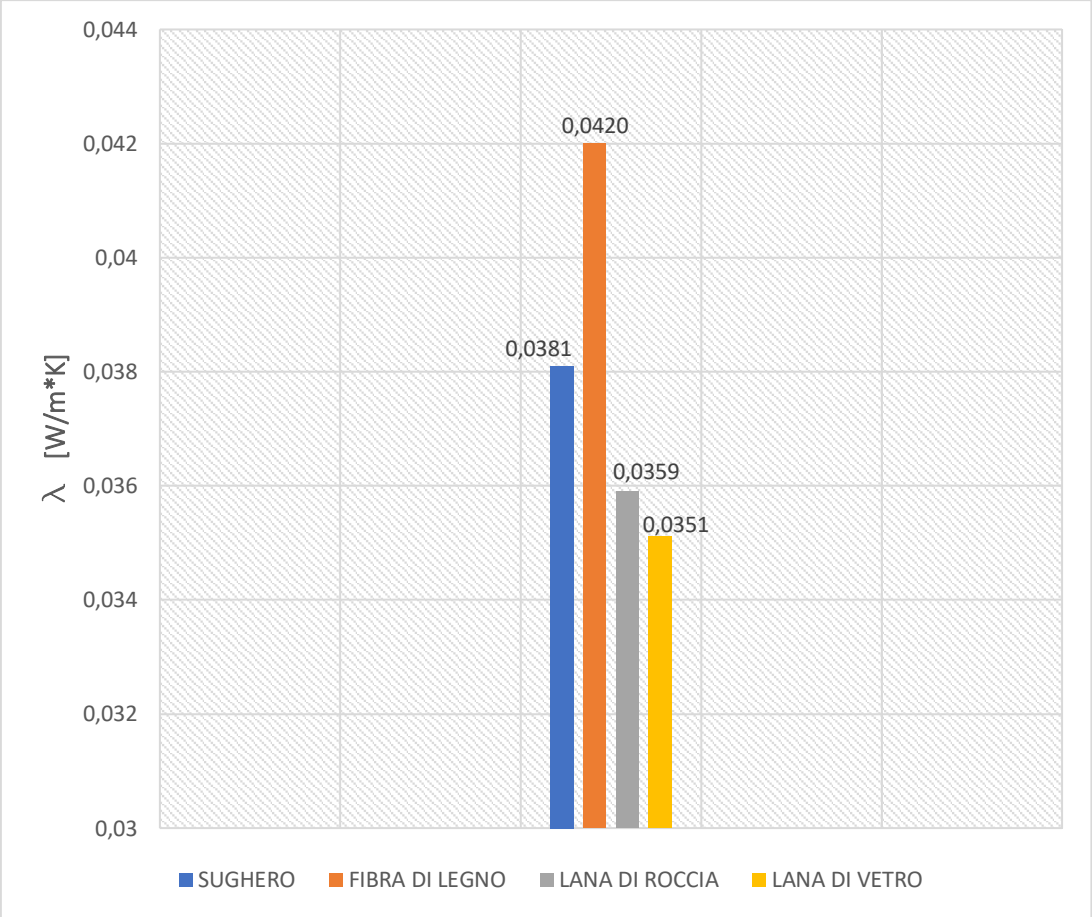
I provini di intonaco a seguito dell'invecchiamento artificiale cambiano la permeabilità al vapore, mostrando una diminuzione del fattore di resistenza al passaggio del vapore.

8.5. Determinazione della conducibilità termica con il metodo del termoflussimetro

Risultati sistema Etics



Risultati isolanti



Considerazioni

I provini a seguito dell'invecchiamento artificiale cambiano la conducibilità, mostrando un aumento della conducibilità.

9. DISCUSSIONE

Lo studio sperimentale che è stato svolto ha permesso di stabilire le caratteristiche di durabilità degli isolanti e dell'intonaco di protezione a seguito dell'esposizione a cicli di nebbia salina.

Scelta dell'invecchiamento artificiale

La scelta dell'invecchiamento artificiale si è basata sulla ricerca di un metodo aggressivo che potesse sollecitare le caratteristiche dei materiali analizzati. In aggiunta si voleva valutare la durabilità dei materiali ricreando un ambiente salino, tipico delle zone costiere. Si è ricostituita un'atmosfera salina con una concentrazione di (100±10) g/L di soluzione di NaCl e acqua secondo la norma UNI EN 14147 [1].

Riferimento bibliografico	Oggetto	Tipologie di invecchiamento
Enea, D., Bellardita, M., Scalisi, P., Alaimo, G. & Palmisano, L. Effects of weathering on the performance of self-cleaning photocatalytic paints. *Cem. Concr. Compos.* 96, 77–86 (2019).	Pitture	Nebbia salina
Marvila, M. T. et al. Durability of coating mortars containing açaí fibers. Case Stud. Constr. Mater. 13, (2020).	Malte con aggregati vegetali	Nebbia salina
Mu, R., Miao, C., Luo, X. & Sun, W. Interaction between loading, freeze-thaw cycles, and chloride salt attack of concrete with and without steel fiber reinforcement. Cem. Concr. Res. 32, 1061–1066 (2002).	Cemento	Attacco da cloruri Gelo e disgelo
Junco, C., Gadea, J., Rodríguez, A., Gutiérrez-González, S. & Calderón, V. Durability of lightweight masonry mortars made with white recycled polyurethane foam. Cem.	Malte con poliuretano espanso	Nebbia salina

Concr. Compos. 34, 1174–1179 (2012).[17]		
Di Bella, G., Fiore, V., Galtieri, G., Borsellino, C. & Valenza, A. Effects of natural fibres reinforcement in lime plasters (kenaf and sisal vs. Polypropylene). Constr. Build. Mater. 58, 159–165 (2014).	Malte a base di calce	Nebbia salina
Bochen, J. Weathering effects on physical-chemical properties of external plaster mortars exposed to different environments. Constr. Build. Mater. 79, 192–206 (2015).	Malte da esterno	Ambienti differenti

In riferimento alle informazioni acquisite con i suddetti articoli di ricerca, si è deciso di effettuare un invecchiamento mediante un ciclo composto da 4 ore di nebbia salina e 8 ore di essiccazione per un totale di 60 cicli in 30 giorni.

Per lo svolgimento della sperimentazione si è progettata una camera idonea per poter contenere tutti i provini che poi successivamente sono stati testati con le stesse modalità di caratterizzazione a tempo T=0. L'invecchiamento è stato concepito in riferimento alla normativa UNI EN 14147:" *Metodi di prova per pietre naturali: Determinazione della resistenza all'invecchiamento mediante nebbia salina"* senza valutare la perdita di massa dei campioni in quando si è voluto valutare l'effetto della nebbia salina e quindi con la possibile presenza di NaCl all'interno dei campioni. La valutazione della perdita di massa implicava la deionizzazione dei campioni, processo ritenuto non consono ai fini dell'obiettivo preposto.

I campioni dopo l'invecchiamento non hanno mostrato segni di degrado sostanziale con perdita di materiale, processo che invece è accaduto ai campioni di intonaco studiati da *Di Bella, G., Fiore, V., Galtieri, G., Borsellino, C. & Valenza et al* [16] mediante il medesimo ciclo di invecchiamento.

Sui campioni analizzati. è stato rilevato del degrado superficiale dovuto dalla variazione cromatica attraverso il deposito del sale ed assorbimento d'acqua, è stata riscontrata una proliferazione di spore fungine significativamente nei provini in Fibra *di Legno* e Sughero.

Valutazione chimica e morfologica della durabilità

Le prove non distruttive relative al metodo del microscopio elettronico a scansione e l'analisi elementare dipendono dalla posizione di prelevazione del campione. I risultati ottenuti sono di tipo qualitativo.

Immagini T_0 Immagini T_{aged}

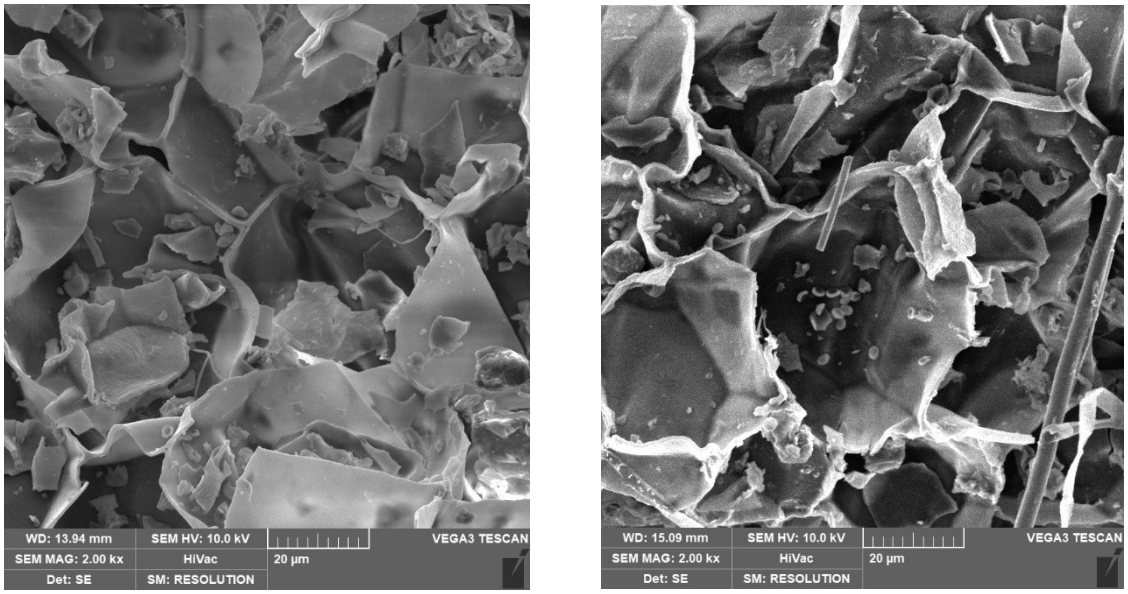


Figura 66: Confronto immagini campioni di Sughero x2000

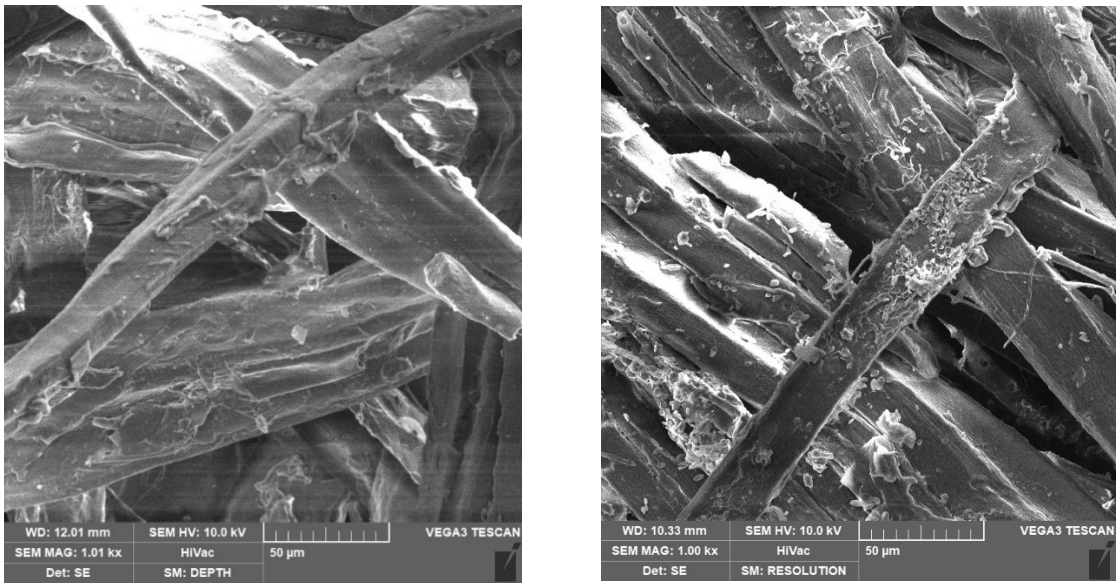


Figura 67: Confronto immagini campioni di Fibra di Legno x1000

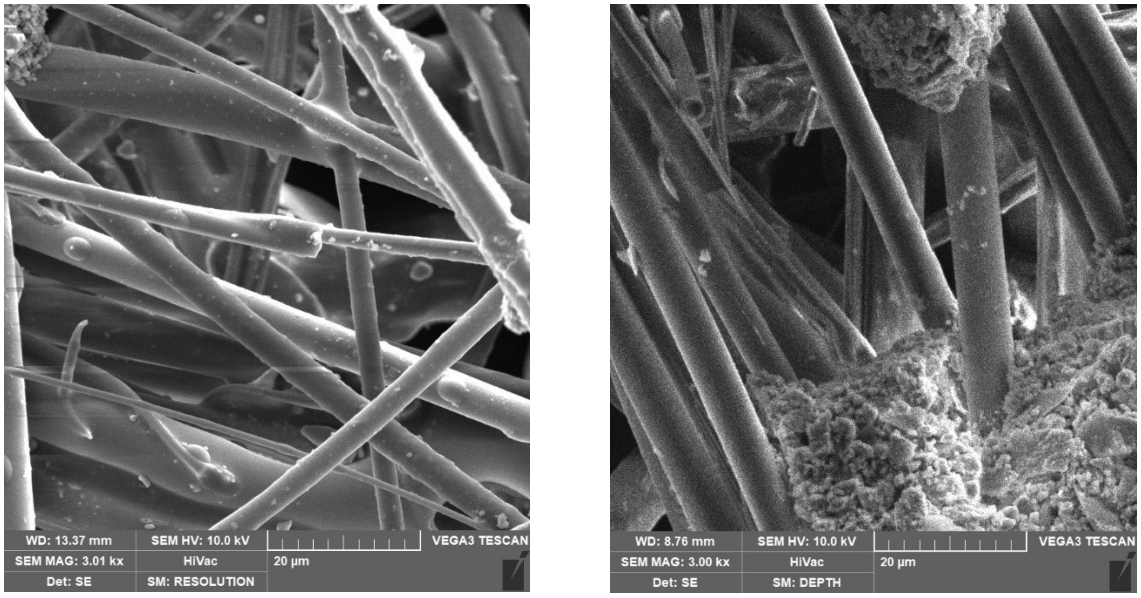


Figura 68: Confronto immagini campioni Lana di Roccia x3000

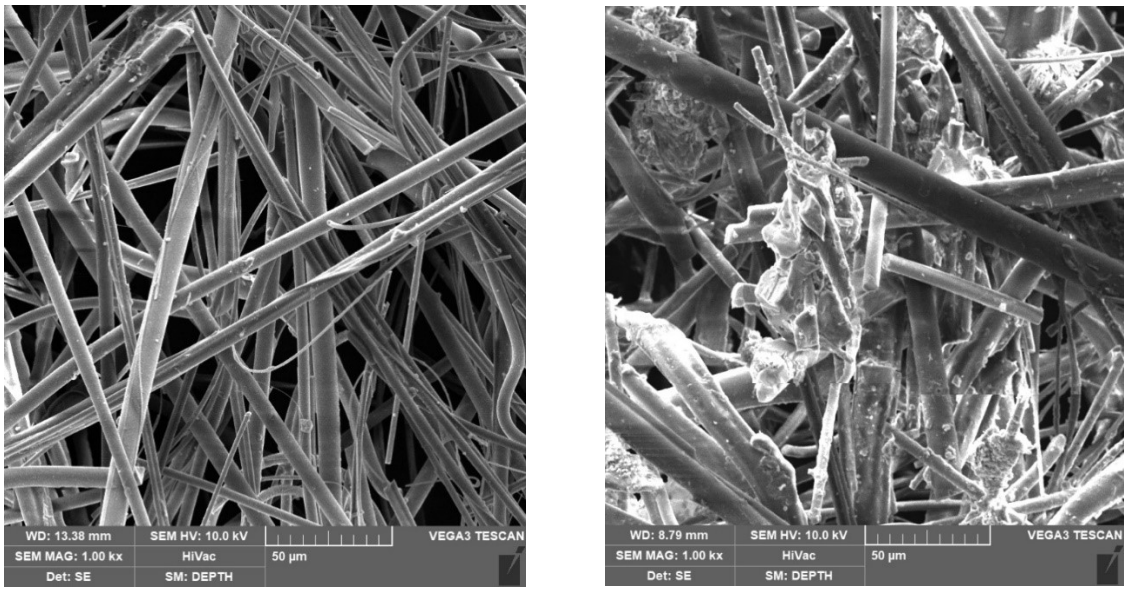


Figura 69: Confronto immagini campioni Lana di Vetro x1000

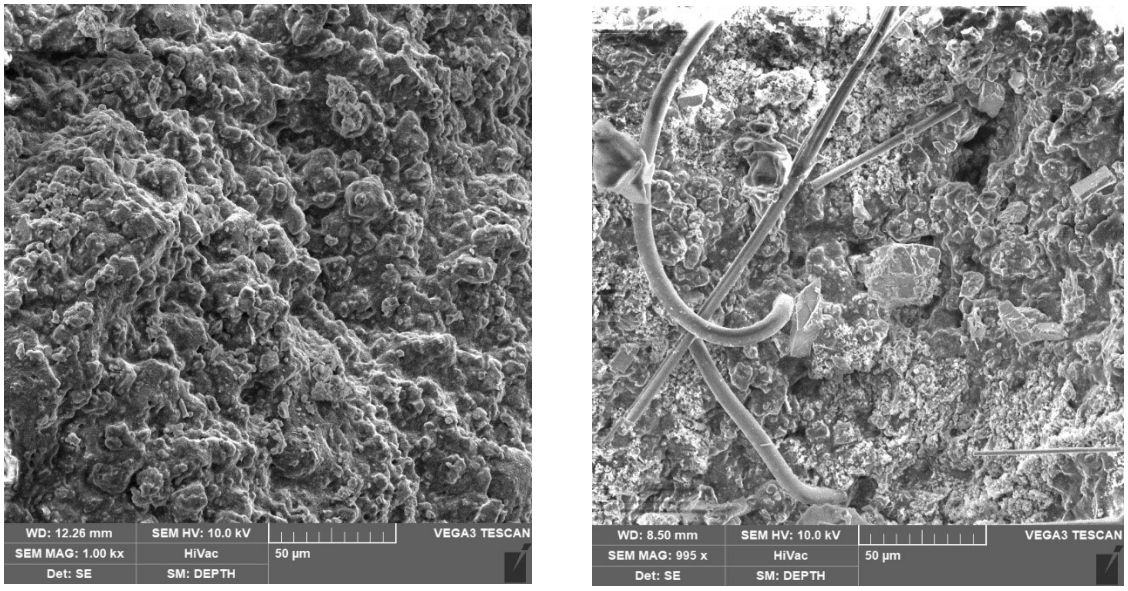


Figura 70: Confronto immagini campioni Finitura x1000

Considerazioni

L'attacco da nebbia salina non ha riportato gravi cambiamenti sui campioni analizzati. Tuttavia, è possibile vedere la proliferazione di spore sui campioni di Sughero e Fibra di Legno, mentre meno visibile sulle fibre minerali, che mostrano un accumulo di NaCl tra le varie fibre. Grazie al SEM è stato quindi possibile vedere la formazione di cristallizzazioni del sale aventi strutture differenti. L'apporto di soluzione, la velocità di evaporazione e il contenuto d'acqua del substrato, determinano la diversa formazione dei cristalli. Inoltre, la forma della struttura cristallizzata dipende molto dallo stato di avanzamento di formazione in quanto non è un sale stabile. In generale è possibile vedere la deposizione di NaCl sulle superficie di tutti i campioni. Il campione di Finitura infine non varia sostanzialmente il suo aspetto, si notano diversi accumuli di NaCl.

Valutazione visiva della durabilità

Figura 71: Provini Lana di Roccia e Fibra di Legno dopo invecchiamento

Figura 72: Sughero e Lana di Vetro dopo invecchiamento

Considerazioni

Appena tolti dalla camera climatica i provini di isolanti senza intonaco hanno subito un'alterazione cromatica, in particolare la Fibra di Legno, con macchie scure sulla superficie. Alterazioni dovute invece a distaccamento di materiale non è stato riscontrato. Per quanto riguardano i provini con intonaco, la finitura superficiale non ha subito fessurazioni o rotture, segno della buona resistenza del prodotto.

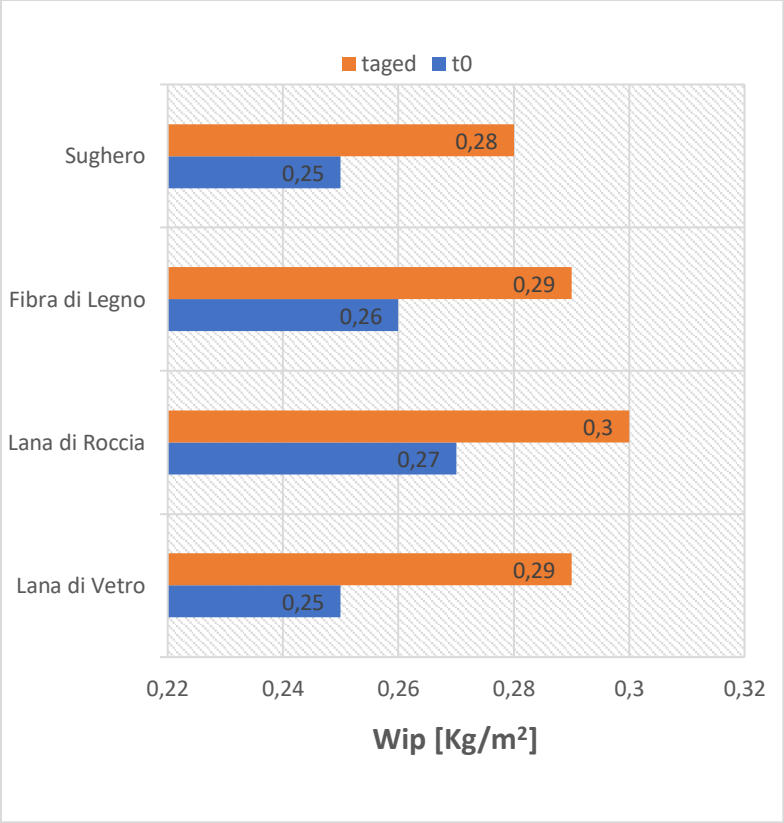
I provini senza intonaco sono stati messi ad asciugare in forno a circa 35°C, in questo modo si sono volute ricreare le stesse condizioni di umidità che avevano T0, dopo di che hanno mostrando meno i segni del processo di invecchiamento; tranne la Fibra di Legno sulla cui superficie è rimasta sempre una patina scura; l'analisi al Sem ha poi confermato che si trattasse di spore fungine.

Valutazione termoigrometrica della durabilità

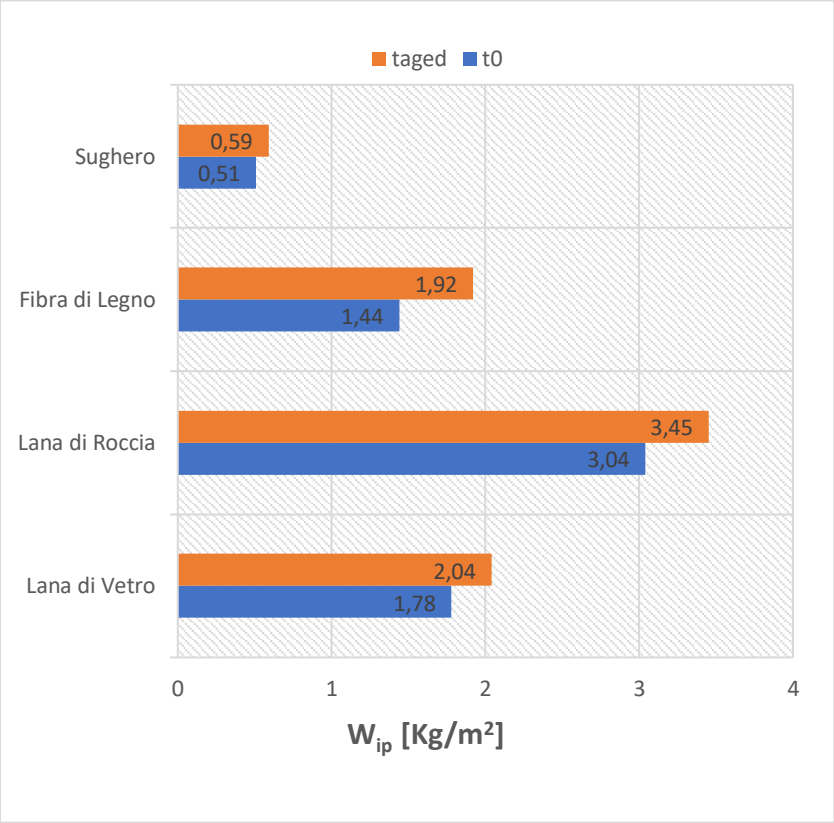
I campioni sono stati sottoposti alle medesime prove e condizioni al contorno in modo da avere un corretto confronto pre e post invecchiamento.

- **Assorbimento d'acqua**

Risultati confronto sistema Etics



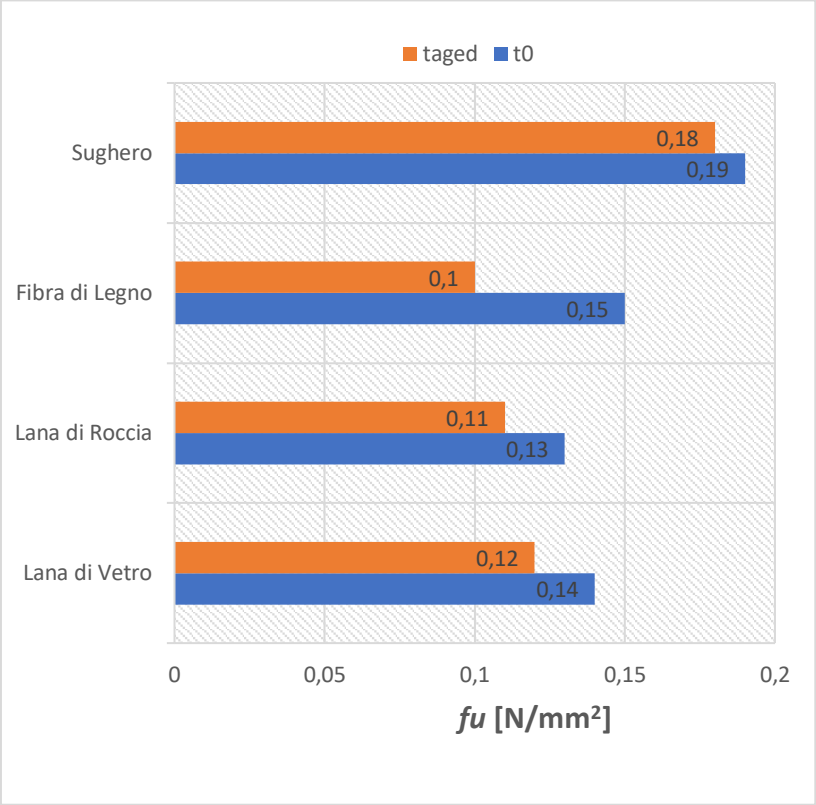
Risultati confronto isolanti



Considerazioni

La prova in conclusione ha rilevato una modifica dell'assorbimento d'acqua, nel sistema Etics si è notato una irrilevante modifica, in quanto il sistema di Finitura ha dato ottimi risultati di durabilità. Per quanto riguarda gli isolanti la Fibra di Legno è quella che ha variato di più il suo assorbimento, pressoché uguali invece gli altri tre tipi, hanno subito una modifica dell'assorbimento d'acqua ma in maniera modesta. Come mostrato in [17] l'assorbimento d'acqua è aumentato di circa due volte sull'isolante Lana di Vetro.

- **Adesione al supporto**

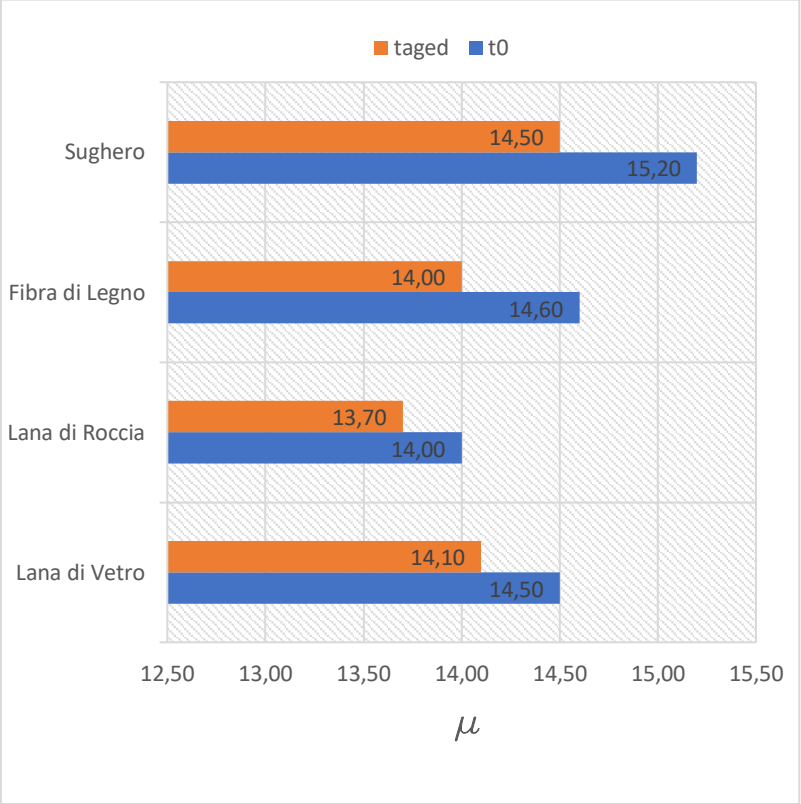


Considerazioni

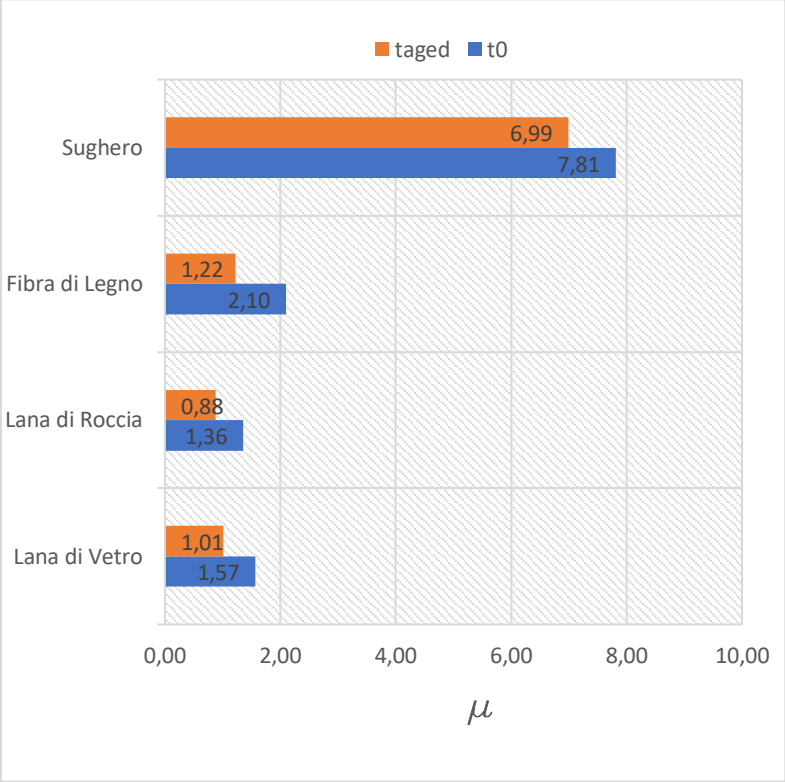
L'invecchiamento ha mostrato una sostanziale diminuzione dell'adesione dell'intonaco sull'isolante Fibra di Legno, inferiore invece è stata per gli isolanti minerali; nettamente inferiore il degrado per il Sughero che ha sostanzialmente lasciata invariata la sua adesione con intonaco. In [18] si è riscontrato invece un aumento dell'aderenza al supporto in eps.

- **Permeabilità al vapore d'acqua**

Risultati confronto sistema Etics



Risultati confronto isolanti

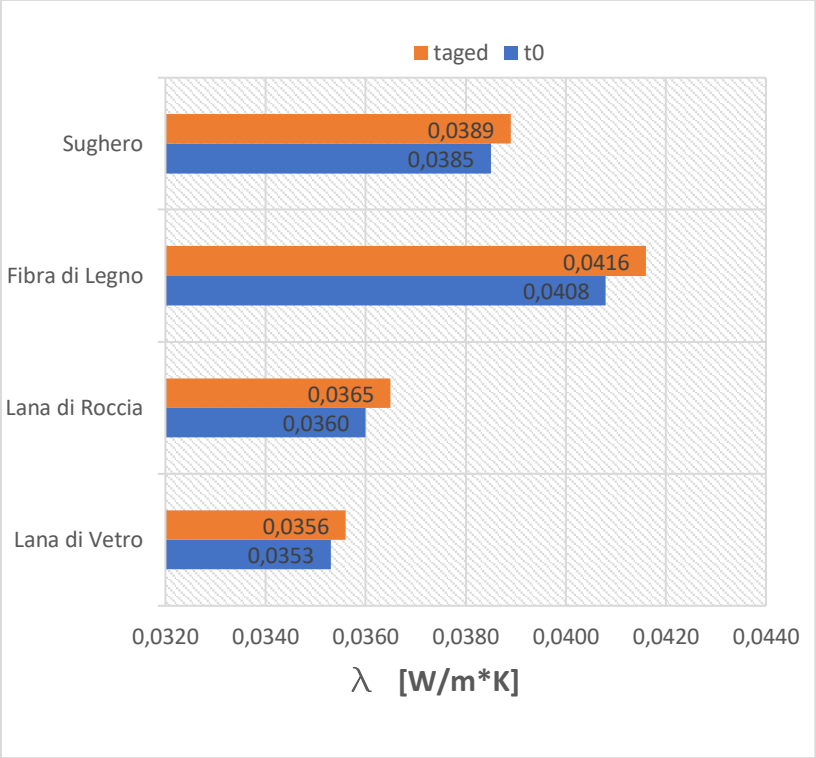


Considerazioni

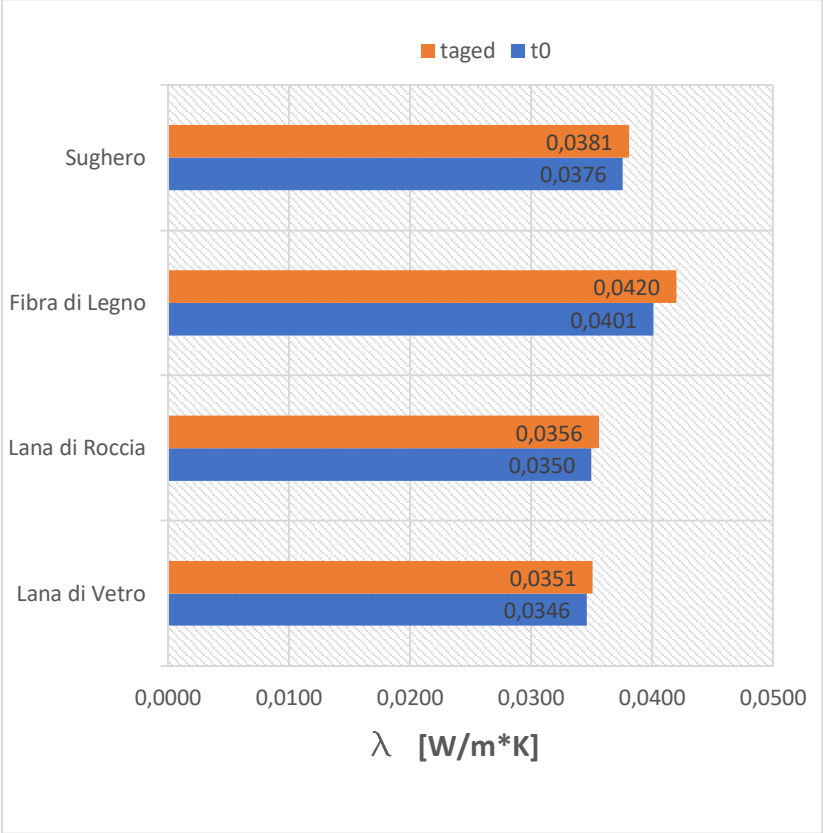
Il fattore di resistenza è rimasto sostanzialmente invariato nel sistema con Finitura superficiale, mentre è notevolmente diminuito in tutti gli isolanti ad eccezione del Sughero.

- **Conducibilità**

Risultati confronto sistema Etics



Risultati confronto isolanti



Considerazioni

Unico parametro che non ha subito variazioni significative, sia nel sistema con finitura che nei soli isolanti, come anche mostrato in [17] tale prestazione non ha subito sostanziali cambiamenti.

10. CONCLUSIONI

Lo studio sperimentale svolto ha permesso di effettuare considerazioni comparative sulla durabilità di 4 isolanti termici per applicazioni a cappotto, con e senza intonaco di finitura. La sperimentazione è stata effettuata tramite invecchiamento artificiale con nebbia salina.

A seguito dell'analisi possiamo affermare che:

- Per quanto riguarda l'analisi al SEM i campioni non hanno subito variazioni sostanziali dal punto di vista morfologico. È possibile osservare la presenza di NaCl e la sua cristallizzazione, oltre che alla proliferazione di spore fungine.

- L'assorbimento non ha subito variazioni significative per i campioni con finitura superficiale, mentre tra gli isolanti la Fibra di Legno ha subito la variazione più significativa.

- L'aderenza al supporto ha mostrato le buonissime proprietà del Sughero, rimanendo quasi invariata dopo l'invecchiamento, buoni i risultati per le fibre minerali, invece la Fibra di Legno ha mostrato maggiormente gli effetti del degrado.

- La permeabilità al vapore è rimasta invariata per i campioni con finitura superficiale, i campioni di isolanti hanno diminuito la resistenza al passaggio di vapore, diventando così più permeabili, maggiormente le fibre minerali e la Fibra di Legno.

- Le prestazioni termiche dei campioni sono rimaste sostanzialmente invariate dinanzi all'attacco da nebbia salina a seguito dello studio sperimentale.

BIBLIOGRAFIA

[1] "UNI EN 14147:2005 Metodi di prova per pietre naturali - Determinazione della resistenza all'invecchiamento mediante nebbia salina." .

[2] J. Maia, N. M. M. Ramos, V. P. De Freitas, and Â. Sousa, "Laboratory tests and potential of thermal insulation plasters," *Energy Procedia*, vol. 78, pp. 2724–2729, 2015, doi: 10.1016/j.egypro.2015.11.613.

[3] N. Belayachi, D. Hoxha, and M. Slaimia, "Impact of accelerated climatic aging on the behavior of gypsum plaster-straw material for building thermal insulation," *Constr. Build. Mater.*, vol. 125, pp. 912–918, 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.08.120.

[4] M. Jerman *et al.*, “Effect of cyclic wetting and drying on microstructure, composition and length changes of lime-based plasters,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 104, no. September, 2019, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2019.103411.

[5] J. Ślusarek, B. Orlik-Kożdoń, J. Bochen, and T. Muzyczuk, “Impact of the imperfection of thermal insulation on structural changes of thin-layer façade claddings in ETICS,” *J. Build. Eng.*, vol. 32, no. January, 2020, doi: 10.1016/j.jobe.2020.101487.

[6] J. Bochen, “Weathering effects on physical-chemical properties of external plaster mortars exposed to different environments,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 79, pp. 192–206, 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.12.079.

[7] “R.J. Schaffer The Weathering of Natural Building Stones Routledge (2016) Google Scholar.” .

[8] M. Záleská, L. Zemanová, M. Pavlíková, and Z. Pavlík, “Thermal, mechanical and structural properties of mortars for rehabilitation of buildings contaminated by chlorides,” *AIP Conf. Proc.*, vol. 1988, p. 5047629, 2018, doi: 10.1063/1.5047629.

[9] C. Groot, R. van Hees, and T. Wijffels, “Selection of plasters and renders for salt laden masonry substrates,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 23, no. 5, pp. 1743–1750, 2009, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2008.09.013.

[10] “UNI EN 1542 "Prodotti e sistemi per la protezione e la riparazione delle strutture di calcestruzzo - Metodi di prova - Misurazione dell'aderenza per trazione diretta".

[11] “UNI EN 12087 ‘Determinazione del coefficiente di assorbimento d’acqua .’” .

[12] “UNI EN 12086 ‘Determinazione della permeabilità al vapore d’acqua.’” .

[13] “UNI EN 12664 ‘Thermal performance of building materials and products - Determination of thermal resistance by means of guarded hot plate and heat flow meter methods - Dry and moist products of medium and low thermal resistance.’”

.

[14] M. Collepardi, J. J. O. Olagot, F. Simonelli, and R. Troli, “Il calcestruzzo vulnerabile: prevenzione, diagnosi del degrado e restauro,” no. March, pp. 25–27, 2005.

[15] D. Enea, M. Bellardita, P. Scalisi, G. Alaimo, and L. Palmisano, “Effects of weathering on the performance of self-cleaning photocatalytic paints,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 96, no. July 2017, pp. 77–86, 2019, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2018.11.013.

[16] G. Di Bella, V. Fiore, G. Galtieri, C. Borsellino, and A. Valenza, “Effects of natural fibres reinforcement in lime plasters (kenaf and sisal vs. Polypropylene),” *Constr. Build. Mater.*, vol. 58, pp. 159–165, 2014, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.02.026.

[17] F.Stazi, F. Tittarelli, G.Politi, C.Di Perna, P.Munafò "assessment of the actual hygrothermal performance of glass mineral wool insulation applied 25 years ago in masonry cavity walls"

[18] M. D’Orazio, P. Stipa, S. Sabbatini, and G. Maracchini, “Experimental investigation on the durability of a novel lightweight prefabricated reinforced-EPS based construction system,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 252, p. 119134, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119134.

11. ALLEGATI

ALLEGATO 1 Sughero

BLACKCORK

PANNELLO SUGHERO BRUNO AUTOESPANSO

Sughero espanso puro in pannelli secondo le norme UNI EN 13170 e UNI EN 13172

DIMENSIONI

Lunghezza mm 1000 x Larghezza mm 500 con tolleranze dimensionali UNI : T_1 - L_1 - W_1

SPESSORI

10 mm, 20 mm, 30 mm, 40 mm, 50 mm, 60 mm, 80 mm, 100 mm, 120mm, 140mm (a richiesta fino a 330 mm)

Riciclabile · Traspirante · Fonoassorbente · Antivibrazione · Atossico · Resistente · Versatile · Ecosostenibile · Isolamento Acustico · Reversibile

CARATTERISTICHE

Massa volumica (P)	108 ÷ 120 Kg/m3
Carico di rottura per trazione	0,6 ÷ 0,9 Kg/cm2
Carico di rottura per flessione	1,25 ÷ 2,31 Kg/cm2
Resistenza alla compressione	1,24 ÷ 1,59 Kg/cm2
Calore specifico	1,67 KJ/Kg °K
Coefficiente di dilatazione termica (a 10°C)	25 ÷ 50 x 10-6
Temperatura di uso	-200 ÷ 130 °C
Resistenza alla diffusione del vapore acqueo (μ)	5 ÷ 30
Modulo di elasticità	5 N/mm2
Classe di reazione al fuoco	Euroclasse "E"
Assorbimento acqua (ws) su spessore 80 mm	WIT < 0,38%±0,12%
Rigidità dinamica (spessore 50 mm)	126 N/cm2
Assorbimento acustico (spessore 40 mm)	0,29 ÷ 0,33 dB (500 Hz)
Conducibilità termica λ (a 10°)	0,0375 W/m °K
Resistenza termica R (m^2K/W)	0,534 - 20mm
	1,068 - 40mm
	1,602 - 60mm
	2,136 - 80mm
	2,670 - 100mm
	3,204 - 120mm
	3,738 - 140mm

ALTRE PROPRIETÀ

Non si disgrega in acqua bollente, buona resistenza agli attacchi degli agenti chimici, stabile nel tempo, elastico antimuffa, imputrescibile, non digeribile da insetti, parassiti e roditori - privo di formaldeide

VOCE DI CAPITOLATO

Sughero espanso puro in pannelli secondo le norme UNI EN 13170 e UNI EN 13172; Massa volumica (P) = 108 ÷ 120 Kg/m3; Resistenza alla diffusione del vapore acqueo (μ) = 5 ÷ 30; Conducibilità termica λ = 0,0375 W/m °K; Assorbimento acustico = 0,29 ÷ 0,33 dB; Certificato CE secondo UNI EN 13170

SACE INSULATION

I consigli e le indicazioni fornite in questa scheda tecnica sono dettate dalla nostra esperienza ma non possono impegnare la nostra responsabilità. Il nostro servizio tecnico è a disposizione per fornire tutte le ulteriori notizie necessarie.

SACE Components Srl - Via dell'Industria, 47 - 63900 - Fermo (FM)
http://insulation.sacecomponents.com - edilizia@sacecomponents.com - Tel: +39 0734 640 631 /750

ALLEGATO 2 Fibra di Legno

Scheda tecnica

Sto-Weichfaserplatte M 042

Lastra isolante in fibra di legno secondo EN 13171

Caratteristica	
Applicazione	• per esterni • come lastra isolante nei sistemi di isolamento termico per facciate StoTherm Wood su costruzioni in legno e su supporti massivi minerali (come muratura e calcestruzzo) • non applicabile nella zona a contatto con il terreno
Proprietà	• Valore nominale della conducibilità termica λ: 0,042 W/(m*K) • blocco unico (monostrato) • Classe di reazione al fuoco E secondo EN 13501-1 • eco-certificato (natureplus®) • densità apparente e conduttività termica omogenee • in fibre di legno impermeabilizzate • rivestibile
Formato	• bordi: spigolo vivo • 125 x 260 cm spigolo vivo - 8, 10, 12, 14, 16 cm • 125 x 280 cm spigolo vivo - 8, 10, 12, 14, 16 cm • 125 x 59 cm spigolo vivo - 2, 4, 6, 8 cm • 83 x 60 cm spigolo vivo - 10, 12, 14, 16 cm • Spessore minimo: 4 cm (per mazzette 2 cm)
Particolarità/indicazioni	• in StoTherm Wood normalmente infiammabile B2 secondo DIN 4102 • tipo di utilizzo WAP e WI secondo DIN 4108-10

Dati tecnici

Criterio	Norma / disposizione di prova	Valore/ Unità	Indicazioni
Coefficiente di resistenza alla diffusione del vapore acqueo μ	EN 12086	3	
Assorbimento di acqua	EN 1609	< 1 kg/m²	

ALLEGATO 3 Lana di Roccia

KNAUF INSULATION

www.knaufinsulation.it

SMARTWALL S C1

Pannello rigido isolante in lana minerale con primer su un lato

Descrizione

Pannello rigido in lana minerale di roccia rivestito su un lato con primer ai silicati di calcio.

SmartWall S C1 è la soluzione ideale per l'isolamento termico e acustico performante e sicuro (**incombustibile – A1**) in applicazione a cappotto (ETICS), grazie al **rivestimento ai silicati di calcio** che rende il pannello immediatamente pronto per accogliere la rasatura armata senza necessità di ulteriori lavorazioni, semplificando la posa del sistema e riducendo i tempi di esecuzione.

Vantaggi

- **Facile da posare grazie al rivestimento ai silicati**
- Incombustibile (**euroclasse A1**)
- Buon isolamento termico invernale (λ_D **0,035 W/mK**) ed estivo (**alta densità**)

Campi di applicazione

- Isolamento termico e acustico in sistemi a "cappotto" (ETICS) su superfici verticali e orizzontali/ inclinate (piani pilotis, sporti di gronda, etc.)
- Sistemi costruttivi tradizionali e a secco (pareti perimetrali in legno, a secco, etc.) e tradizionali
- Nuova costruzione e ristrutturazione/ riqualificazione di edifici esistenti

Indicatori di impatto ambientale

EPD N°: S-P-01848

Global warming potential - GWP: **10,6 kg CO_2 - Eq**

Ozone Depletion Potential - ODP: **1,5 E^{-11} kg CFC11 - Eq**

Use of secondary materials / Recycled content: **2,15 kg (21,5% > 15%)**

Acidification Potential: **0,09 kg SO^2 - Eq**

I valori sono calcolati considerando come unità funzionale 1 m^2 di prodotto di spessore pari a 100 mm e con riferimento alla sola fase di produzione del materiale (approvvigionamento e trasporto materia prima, produzione del materiale).

Certificazioni

EPD®

CAM PRODOTTO

Note

Per approfondimenti vai su www.knaufinsulation.it

02/2021

ALLEGATO 4 Lana di Vetro

Scheda tecnica

Isover Clima34 G3

Pannello rigido in lana di vetro G3 di dimensioni 60x120 cm e spessore variabile, prodotta in Italia con almeno l'80% di vetro riciclato e trattata con resina termoindurente di nuova generazione a base di componenti organici e vegetali. Ad alta densità ed idrorepellente. Senza rivestimenti.
E' conforme ai CAM (Criteri Ambientali Minimi) D.M. 11 ottobre 2017, art. 2.4.2.9

CE EN 13162:2012+A1:2015

λ 0,034

A2-s1,d0

Campi d'impiego

Pannelli ideali per l'isolamento a cappotto di pareti perimetrali e piani pilotis, consigliati sia per interventi di recupero e di miglioramento delle prestazioni energetiche di edifici esistenti che di nuova costruzione.
Assicurano all'edificio un comportamento termico ottimale, sia in fase invernale che estiva.
Contribuiscono all'isolamento acustico e alla difesa dai rumori esterni (traffico e in generale rumori aerei) e quindi al comfort degli ambienti interni.
Sono compatibili sia con le tecniche costruttive tradizionali che con le moderne tecnologie a secco di tamponamento perimetrale.
Inoltre rappresentano un'ottima soluzione per la sicurezza antincendio, in quanto non contribuiscono allo sviluppo e propagazione di fiamme in caso di incendio

Vantaggi

- Isolamento termico e acustico in un solo prodotto
- Comportamento al fuoco: reazione al fuoco Euroclasse A2-s1,d0 (non combustibile)
- Traspirabilità (μ=1)
- Stabilità dimensionale e durata nel tempo
- Idrorepellenza
- Adattabilità alle superfici
- Ecosostenibilità
- Facilità di taglio
- Resistenza agli urti
- Pannello da cappotto in lana minerale con valore di conducibilità termica λ pari a 0,034 W(m K)

Stoccaggio

Il prodotto deve essere immagazzinato al coperto, in ambienti ben ventilati e lontano da fonti di calore dirette.

Altre caratteristiche

Per facilitare la posa in opera e il corretto orientamento di montaggio, ogni pannello riporta una marchiatura su una faccia per identificare il lato su cui applicare l'intonaco sottile (rasatura).
Prodotto di agevole manipolazione e taglio, meccanicamente resistente, resistente all'insaccamento, imputrescibile, inattaccabile dalle muffe. Nelle previste condizioni d'impiego il prodotto è stabile nel tempo.

Saint-Gobain Italia S.p.A.
Via E. Romagnoli, 6 • 20146 Milano
info.it.isover@saint-gobain.com | www.isover.it

ISOVER SAINT GOBAIN

ALLEGATO 5 Rasante

Keraklima Eco

Adesivo&Rasante minerale, eco-compatibile, idoneo per l'incollaggio e la rasatura ad alta resistenza dei pannelli isolanti ad uso cappotto esterno, ideale nel GreenBuilding. Prodotto del Sistema a cappotto Kerakoll con Benestare Tecnico Europeo ETA secondo EAD 040083-00-0404. Monocomponente, a bassissime emissioni di sostanze organiche volatili e ridotte emissioni di CO_2, riciclabile come inerte a fine vita.

Keraklima Eco è specifico per l'incollaggio e la rasatura di sistemi per l'isolamento a cappotto su pannelli termoisolanti quali polistirene espanso, sinterizzato ed estruso, poliuretano, resina fenolica, sughero, lana di roccia e di vetro, fibra di legno, aerogel, su calcestruzzo, intonaco cementizio, rasanti minerali e cementizi. Bianco e Grigio. Interni, esterni.

GREENBUILDING RATING®

Keraklima Eco
- Categoria: Inorganici minerali
- Sistemi costruttivi

rating 4

SISTEMA DI MISURAZIONE ATTESTATO DALL'ENTE DI CERTIFICAZIONE SGS

PLUS PRODOTTO

- Elevata adesione per pose sicure in cantiere
- Eccellente lavorabilità per facilitare l'applicazione come rasante
- Applicabile a spruzzo con macchine intonacatrici per velocizzare la lavorazione
- Bianco e grigio
- Finitura ad effetto civile fino
- Prodotto del Sistema KlimaExpert ETA

ECO NOTE

- Formulato con minerali regionali a ridotte emissioni di gas serra per il trasporto
- Riciclabile come inerte minerale evitando oneri di smaltimento e impatto ambientale

CAMPI D'APPLICAZIONE

Destinazione d'uso
Incollaggio e rasatura di sistemi a cappotto per:
- sistemi KlimaExpert ETA
- isolamenti esterni
- isolamenti interni
- incollaggio di lastre isolanti sottotegola

Interni ed esterni su pannelli termocoibenti ad uso cappotto (ETICS) quali polistirene espanso, sinterizzato ed estruso, poliuretano, resina fenolica, sughero, lana di roccia e di vetro, fibra di legno, aerogel, su calcestruzzo, laterizio, intonaco cementizio, rasanti minerali e cementizi.

Non utilizzare
Su pareti in gesso o intonaci pronti a base gesso; per l'incollaggio di piastrelle ceramiche o pietre naturali; su supporti in legno o metallo.

INDICAZIONI D'USO

Le indicazioni d'uso si riferiscono, dove previsto, al Rapporto Tecnico Italiano UNI/TR 11715 "Isolanti Termici per edilizia – Progettazione e messa in opera dei sistemi isolanti termici per l'esterno (ETICS)".

Preparazione dei supporti (UNI/TR 11715 – paragrafo 7)
Il fondo deve essere perfettamente planare, consistente, privo cioè di parti friabili o facilmente asportabili, dimensionalmente stabile, pulito ed asciutto. Sottofondi non compatti vanno trattati preventivamente con il fissativo consolidante Rasobuild® Eco Consolidante.

* ÉMISSION DANS L'AIR INTÉRIEUR Information sur le niveau d'émission de substances volatiles dans l'air intérieur, présentant un risque de toxicité par inhalation, sur une échelle de classe allant de A+ (très faibles émissions) à C (fortes émissions).

KERAKOLL
The GreenBuilding Company

Keraklima Eco Code D730 2020/05

ALLEGATO 6 Finitura

Kerakover Eco Kompact

Rivestimento fibrato organico minerale eco-compatibile, colorato nella massa, a base di resine acriliche all'acqua e silossani idrofobizzanti, ideale nel GreenBuilding. Prodotto specifico del Sistema a cappotto Kerakoll con Benestare Tecnico Europeo ETA secondo EAD 040083-00-0404. Esente da solventi, rispetta l'ambiente e la salute degli operatori.

Kerakover Eco Kompact realizza rivestimenti decorativi a spessore, resistenti alle alghe ed agli agenti atmosferici, compatibile con sistemi termoisolanti a cappotto. Flessibile, di ottima lavorabilità, consente la realizzazione di superfici chiuse ad effetto compatto. Disponibile in tre granulometrie: extrafine, fine e media.

GREENBUILDING RATING®

Kerakover Eco Kompact
- Categoria: Organici minerali
- Protezione e decorazione

Rating calcolato sulla media delle formulazioni dei colori

rating 4

Contenuto di minerali naturali 77%

Esente da solventi

Nessuno etichettatura di rischio ambientale

Non tossico o non pericoloso

SISTEMA DI MISURAZIONE ATTESTATO DALL'ENTE DI CERTIFICAZIONE SGS

PLUS PRODOTTO

- Disponibile in tre granulometrie: extrafine, fine e media.
- Resistente agli attacchi di muffe, alghe e funghi
- Effetto compatto
- Elevata resistenza agli agenti atmosferici
- Pregiato aspetto estetico
- Fibrato
- Idoneo per sistema a cappotto
- Prodotto del Sistema KlimaExpert ETA
- Di facile applicazione

ECO NOTE

- Formulato con minerali regionali a ridotte emissioni di gas serra per il trasporto
- Garantisce un uso più sicuro in cantiere

CAMPI D'APPLICAZIONE

Destinazione d'uso
Kerakover Eco Kompact è adatto per:
- intonaci nuovi stagionati
- intonaci vecchi ben aderenti al supporto murario
- elementi in conglomerato cementizio
- elementi prefabbricati in CLS
- superfici rivestite con finiture di natura sintetica o minerale, non degradate
- sistema termocoibente a cappotto
- sistemi KlimaExpert ETA
- superfici a base gesso purché adeguatamente preparate
- cartongesso

Cool Colors Solar-Scud
Kerakover Eco Kompact è tinteggiabile nelle 69 tonalità della cartella Cool Colors Solar-Scud. I colori sono formulati con l'utilizzo di speciali pigmenti termoriflettenti che riflettono gran parte della radiazione solare incidente rimanendo dunque più freddi e risolvono la problematica del surriscaldamento delle pareti verticali opache, nonostante la colorazione intensa.

La linea di finiture Cool Colors Solar-Scud è la soluzione intelligente studiata per decorare le facciate esterne degli edifici rendendole altamente riflettenti senza rinunciare alla scelta di tinte forti, per ogni tipologia di intervento su:
- sistemi a cappotto ETICS conformi alle indicazioni del Regolamento Tecnico UNI/TR 11715
- decorazione di facciata non cappottata
- ripristino di vecchie facciate
- interventi di manutenzione di vecchi sistemi a cappotto

Non utilizzare
in presenza di umidità di risalita.

* ÉMISSION DANS L'AIR INTÉRIEUR Information sur le niveau d'émission de substances volatiles dans l'air intérieur, présentant un risque de toxicité par inhalation, sur une échelle de classe allant de A+ (très faibles émissions) à C (fortes émissions).

KERAKOLL
The GreenBuilding Company

Kerakover Eco Kompact Code: KKF 2020 (10_)

ALLEGATO 7 Rete

Rinforzo V 50

Rete di armatura in fibra di vetro alcali resistente, idonea per il rinforzo di rasature su intonaci nuovi o da recuperare, specificatamente studiata per l'inserimento all'interno di sistemi termoisolanti a cappotto.

Rinforzo V 50 incrementa le prestazioni di elasticità, compattezza e resistenza alle più critiche temperature d'esercizio. Elimina i problemi di crepe o fessurazioni dovute ad alterazioni dinamiche. Interni, esterni.

PLUS PRODOTTO

- Alta resistenza elastica e meccanica
- Prodotto del Sistema KlimaExpert ETA
- Bande colorate per facilitare il sormonto
- Inalterabilità all'interno di un ambiente alcalino, alle aggressioni chimiche o da parte di micro-organismi
- Facilità e velocità di posa rendono agevole l'impiego negli interventi di ripristino di superfici da rinnovare
- Marcatura CE di prodotto per l'utilizzo come armatura di rasanti di origine minerale (EAD-040016-00-0404)

CAMPI D'APPLICAZIONE

Destinazione d'uso
Armatura di rasanti minerali, cementizi o a calce.

Rasanti compatibili:
- rasanti minerali in genere

Fondi:
- calcestruzzi prefabbricati e gettati in opera
- intonaci di facciata
- pannelli termocoibenti

Interni, esterni ad uso civile, commerciale e industriale.

Non utilizzare
Su giunti di dilatazione o a diretto contatto con il sottofondo.

INDICAZIONI D'USO

Le indicazioni d'uso per le applicazioni nei sistemi termoisolanti a cappotto si riferiscono, dove previsto, al Rapporto Tecnico Italiano UNI/TR 11715 "Isolanti Termici per edilizia – Progettazione e messa in opera dei sistemi isolanti termici per l'esterno (ETICS)".

Preparazione
Togliere l'imballo protettivo e srotolare la rete. Rinforzo V 50 si taglia con ordinarie forbici o cutter.

Applicazione
Rinforzo V 50 si applica sulla prima mano di prodotto ancora fresco. Stendere la rete e farla aderire con la pressione della spatola. I fogli vanno sovrapposti per almeno 10 cm sui sormonti. Le bande verdi laterali facilitano il corretto sormonto.
Per le applicazioni nei sistemi termoisolanti a cappotto le indicazioni riportate fanno riferimento a UNI/TR 11715 – paragrafo 9.

Pulizia
Rinforzo V 50 non richiede pulizie. Gli attrezzi utilizzati per applicare i materiali impiegati per il suo inglobamento vanno puliti rispettando le prescrizioni delle relative schede tecniche.

Rinforzo V50 Code: EM 2 2011/01

* ÉMISSION DANS L'AIR INTÉRIEUR Information sur le niveau d'émission de substances volatiles dans l'air intérieur, présentant un risque de toxicité par inhalation, sur une échelle de classe allant de A+ (très faibles émissions) à C (fortes émissions).

KERAKOLL
The GreenBuilding Company

12. RINGRAZIAMENTI

Vorrei fare i miei ringraziamenti alla Prof.ssa Stazi Francesca, per la disponibilità dimostrata durante tutta la sperimentazione.

Al Professor Costanzo Di Perna per la comprensione, l'interesse e la messa a disposizione del suo laboratorio.

Alla Prof.ssa Tittarelli Francesca, per la sua grande professionalità e disponibilità.

Al tecnico Francesco, per avermi aiutato nella realizzazione della camera climatica di nebbia salina.