



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea triennale in Ingegneria Civile e Ambientale

**CAPACITÀ TERMO-IGROMETRICA E DISINQUINANTE DI UN
PANNELLO MULTISTRATO A BASE DI SCARTI DI BIOMASSA**

**Thermo-hygrometric and depolluting capacity of a multilayer panel based on
biomass waste**

Relatrice:

Prof.ssa Tittarelli Francesca

Tesi di Laurea di:

Di Pietro Aurora

Correlatrice:

Ing. Mobili Alessandra

Correlatrice:

Ing. Blasi Elisa

A.A. 2023/2024

INDICE

| | |
|--|-----------|
| INTRODUZIONE | 4 |
| Capitolo 1: MATERIALI..... | 7 |
| 1.1 Pannelli di supporto | 7 |
| 1.1.1 Canapannel | 7 |
| 1.1.2 XPS..... | 8 |
| 1.2 Intonaci..... | 9 |
| 1.2.1 Mapetherm | 9 |
| 1.2.2 Rasobuild | 10 |
| 1.2.3 CanapaMix3..... | 11 |
| 1.3 Finiture | 14 |
| 1.3.1 Finitura UNIVPM..... | 14 |
| 1.3.2 Pitture commerciali | 27 |
| 1.4 Primers | 29 |
| 1.4.1 Canaprimer | 29 |
| 1.4.2 Fissativo per pittura Iris Color | 30 |
| 1.5 Resina per prove Pull-off | 31 |
| Capitolo 2: PREPARAZIONE PROVINI..... | 34 |
| 2.1 Taglio supporti in XPS..... | 34 |
| 2.2 Taglio supporti in Canapa | 36 |
| 2.3 Preparazione profili per il getto | 37 |
| 2.4 Getti di prova delle miscele | 39 |
| 2.4.1 Mapetherm | 39 |
| 2.4.2 Rasobuild | 41 |
| 2.4.3 CanapaMix3..... | 42 |

| | | |
|---|---|------------|
| 2.4.4 | <i>UNIVPM</i> | 43 |
| 2.5 | <i>Getti definitivi delle miscele</i> | 45 |
| 2.5.1 | <i>Mapetherm</i> | 45 |
| 2.5.2 | <i>Rasobuild</i> | 47 |
| 2.5.3 | <i>CanapaMix3</i> | 49 |
| 2.5.4 | <i>UNIVPM</i> | 50 |
| 2.6 | <i>Fessurazione</i> | 53 |
| 2.6.1 | <i>Stesura pittura</i> | 53 |
| Capitolo 3: CARATTERIZZAZIONE DEI CAMPIONI | | 56 |
| 3.1 | <i>Caratterizzazione meccanica delle malte</i> | 56 |
| 3.1.1 | <i>Resistenza meccanica a flessione e compressione delle varie malte</i> | 56 |
| 3.1.2 | <i>Pundit</i> | 60 |
| 3.2 | <i>Pull-off/ Aderenza</i> | 66 |
| 3.3 | <i>Conducibilità termica</i> | 72 |
| 3.4 | <i>Adsorbimento VOCs (Volatile Organic Compounds/ Composti Organici Volatili)</i> | 75 |
| 3.5 | <i>Attività fotocatalitica mediante NOx</i> | 86 |
| 3.6 | <i>Permeabilità al vapore</i> | 94 |
| 3.7 | <i>MBV (Moisture Buffer Value/ Capacità Igrometrica)</i> | 99 |
| CONCLUSIONI | | 105 |
| BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA | | 109 |

INTRODUZIONE

Il seguente elaborato intitolato "Capacità termo-igrometrica e disinquinante di un pannello multistrato a base di scarti di biomassa", si inserisce all'interno di un progetto di ricerca più ampio di cui l'Università Politecnica delle Marche (UNIVPM) è partner.



Figura 1: Logo progetto MULTICLIMACT

Il progetto, chiamato “**MULTICLIMACT: MULTI-faceted CLIMate adaptation ACTions to improve resilience, preparedness and responsiveness of the built environment against multiple hazards at multiple scales**” (Figura 1) finanziato dalla Commissione Europea nell’ambito del programma Horizon Europe mediante Grant Agreement n. 101123538¹, ha l’obiettivo di migliorare la resilienza, la preparazione e la capacità di risposta dell’ambiente costruito e dei suoi abitanti di fronte al cambiamento delle condizioni climatiche e all’aumento degli eventi estremi. MULTICLIMACT mira a realizzare un quadro di riferimento completo e un kit di strumenti per valutare e rafforzare la resilienza a varie scale, considerando sia i rischi naturali che le vulnerabilità della catena di approvvigionamento, attuando un approccio multidisciplinare e multiforme che consiste in un insieme di azioni innovative di adattamento, tra cui design, materiali e soluzioni digitali. Inoltre, tale progetto si concentra anche sul benessere umano e sulla qualità della vita come aspetti fondamentali.²

Per il presente lavoro di tesi, è stata utilizzata una finitura innovativa sviluppata dall'UNIVPM all’interno di un ulteriore progetto denominato “**MAMMUT**” (Malta multifunzionale a basso impatto Ambientale per il risparmio energetico, il coMfort e la salUbrità degli ambienTi di vita) finanziato dall’Università Politecnica delle Marche nell’ambito del programma Proof of Concept (PoC) FASTER con CUP C36I20000130006. La malta in questione, studiata specificamente per le sue proprietà termo-igrometriche e disinquinanti, è stata applicata sulla superficie di pannelli multistrato a base di fibre di biomassa, in particolare su pannelli in canapa.

¹ <https://multiclimact.eu/>

² <https://www.cmcc.it/it/projects/multiclimact-multi-faceted-climate-adaptation-actions-per-migliorare-la-resilienza-la-preparazione-e-la-capacita-di-risposta-dellambiente-costruito-a-fronte-di-molteplici-pericoli-su-piu-scale>

L'obiettivo principale del mio lavoro di tesi è stato quello di analizzare e valutare sei combinazioni differenti: tre con supporti ricavati da pannelli in fibre di canapa e tre con supporti da pannelli commerciali in XPS. Ciascuno dei supporti viene combinato con l'utilizzo della finitura brevettata dall'UNIVPM e ottimizzata nel progetto MAMMUT, che chiameremo semplicemente "finitura UNIVPM" o "UNIVPM", con l'utilizzo di finiture commerciali e pitture commerciali dalle diverse prestazioni.

Il primo step del progetto è stato quello di reperire pannelli in fibra di canapa compressa derivanti dalla canapa sativa commercializzati dall'azienda Edilcanapa S.r.l., in questo materiale naturale capace di tutelare l'ambiente e migliorare la qualità della vita. Questa pianta, preziosa per i suoi molteplici utilizzi, si è rivelata ideale per le finalità della bioedilizia.³

Le caratteristiche generali dei pannelli sopracitati sono le seguenti:

1. Isolano dal freddo e dal caldo (ottimi valori di sfasamento termico superiori rispetto agli isolanti sintetici).
2. Riducono muffe e condense grazie all'elevata traspirabilità.
3. Hanno capacità di accumulare calore e umidità ridistribuendola in maniera omogenea.
4. Sono ideali anche per il restauro di edifici storici.
5. Migliorano il comfort acustico grazie al suo potere fonoassorbente.

Durante il processo produttivo, questi pannelli assorbono CO₂ dall'atmosfera e presentano una bassa energia incorporata, rispettando così i principi di sostenibilità sociale e ambientale.⁴

Questo approccio mira a promuovere l'utilizzo di materiali sostenibili e resilienti, in linea con gli obiettivi del progetto MULTICLIMACT. Con questa tesi, non solo si valutano le capacità termigrometriche e disinguantanti dei materiali impiegati, ma si dimostra anche come soluzioni basate su materiali di recupero possano contribuire a migliorare la qualità della vita e il benessere delle persone.

Inoltre, si offre un contributo significativo al campo della sostenibilità ambientale e dell'adattamento climatico, integrando conoscenze teoriche e sperimentali.

³ <https://www.edilcanapasrl.it/azienda/>

⁴ <https://www.edilcanapasrl.it/prodotto/canapannel/>

Capitolo 1

MATERIALI

1.1 Pannelli di supporto

In questa sperimentazione sono stati impiegati due tipi di pannelli come supporti.

1.1.1 Canapannel

Il Canapannel 100 (Figura 2) è un pannello in fibra in canapa compressa, con densità 100 kg/m³, altamente traspirante e dotato di un elevato isolamento termico, adatto sia per nuove costruzioni che per ristrutturazioni o correzioni termiche e/o acustiche di ambienti esistenti. Queste caratteristiche rispondono ai requisiti richiesti per un materiale da costruzione in linea con uno sviluppo sostenibile.

I suoi campi di applicazione includono:

- Sistema di isolamento a cappotto.
- Isolamento tetto.
- Isolante intercapedine.

I pannelli utilizzati hanno dimensioni 110 cm x 60 cm x 4 cm e, nel nostro caso, saranno utilizzati come lastre di isolamento per ambienti indoor.⁵



Figura 2: Canapannel 100 - pannello in fibra di canapa

⁵ <https://www.edilcanapasrl.it/wp-content/uploads/2023/11/canapanel-100-2023-60-x110-con-DOP-Rev-1.pdf>

1.1.2 XPS

Il pannello in XPS (Figura 3), polistirene estruso wafferato, con dimensioni di 110 cm x 60 cm x 4 cm è un polimero termoplastico con densità compresa tra 28-45 kg/m³. Grazie alla sua struttura a celle chiuse, il polistirene estruso offre una maggiore resistenza e migliori prestazioni meccaniche rispetto ad altri materiali isolanti. L'XPS ha un'ampia varietà di applicazioni, tra cui l'isolamento di edifici, tetti e pavimenti in cemento, nonché l'uso nell'artigianato e nella costruzione di modelli.

È noto per la sua bassa conducibilità termica, che varia tipicamente tra 0,025 e 0,040 W/m·K, rendendolo un eccellente isolante termico. Questa proprietà è dovuta alla sua struttura cellulare, che intrappola l'aria e minimizza la conduzione del calore, migliorando l'efficienza energetica degli edifici. Inoltre, l'XPS è altamente resistente all'umidità, il che lo rende ideale per applicazioni in cui è necessaria una barriera contro l'acqua, come l'isolamento delle fondazioni e delle pareti esterne.⁶

La lastra è conforme ai Criteri Ambientali Minimi (CAM), ha marcatura CE secondo la norma UNI EN 13164, presenta una superficie wafferata e ha una finitura perimetrale a spigolo vivo.



Figura 3: Pannello in XPS

⁶<https://www.thermal-engineering.org/what-is-extruded-polystyrene-xps-definition/>

1.2 Intonaci

1.2.1 Mapetherm

Il Mapetherm AR1 GG (Figura 4) è una polvere disponibile in versione grigia o bianca, composta da cemento, sabbie selezionate, resine sintetiche, fibre di polipropilene e additivi speciali, formulata nei laboratori di ricerca MAPEI S.p.A.. Quando viene impastata con acqua, si trasforma in una malta cementizia monocomponente per l'incollaggio, per la rasatura di pannelli termo-isolanti e per sistemi di isolamento a cappotto dalle seguenti caratteristiche:

- Bassa viscosità, che ne facilita la lavorabilità.
- Elevata tissotropia, che consente l'applicazione su superfici verticali senza colature e previene lo scivolamento dei pannelli isolanti, anche di grandi dimensioni.
- Ottima adesione a tutti i tipi di pannelli isolanti e ai materiali edili più comuni, come intonaci tradizionali, rasature, vecchie pitture o rivestimenti plastici ben aderenti.
- Indurimento senza ritiri apprezzabili, garantendo stabilità e durata.

Applicazioni principali:

- Incollaggio di pannelli isolanti come polistirene espanso/estruso, poliuretano espanso, fibre minerali, sughero e fibra di legno su pareti o soffitti, su intonaco, muratura o calcestruzzo.
- Rasatura di pannelli termoisolanti con rete di rinforzo in fibra di vetro, per sistemi di isolamento a cappotto su pareti interne ed esterne.

Il Mapetherm AR1 GG si rivela particolarmente adatto per l'incollaggio e la rasatura di pannelli termoisolanti in numerose applicazioni edili, sia per interni che per esterni.⁷ Grazie alle sue proprietà (Tabella 1 e 2), è utilizzato con efficacia nel contesto specifico del nostro progetto, rispondendo alle esigenze di isolamento e rifinitura richieste.

Tabella 1: Prestazioni finali Mapetherm

| | |
|---|--------------------|
| Modulo elastico (N/mm ²) | 5,500 |
| Resistenza a flessione a 28 gg (N/mm ²) | ~ 3,0 |
| Temperatura di esercizio | Da -30 °C a +90 °C |

Tabella 2: Caratteristiche Mapetherm in accordo normativa EN 998-1

| Caratteristica prestazionale | Metodo di prova | Polvere grigia |
|--|-----------------|----------------------|
| Densità prodotto indurito (kg/m ³) | EN 1015-10 | 1.200 |
| Resistenza a compressione a 28 gg | EN 1015-11 | 9,59 Categoria CS IV |

⁷ Scheda tecnica Mapetherm https://cdnmedia.mapei.com/docs/librariesprovider47/products-documents/1_477-mapethermar1gg-it_956fc08c9652434f986bef3ee4c747bb.pdf?sfvrsn=e34d2092_0

| | | |
|---|------------|-------------------|
| (N/mm ²) | | |
| Assorbimento d'acqua per capillarità [kg/(m ² ·min ^{0,5})] | EN 1015-18 | 0,06 Categoria W2 |
| Coefficiente di permeabilità al vapore acqueo (μ) | EN 1015-19 | 13 |
| Conducibilità termica (λ _{10 dry}) (W/mK): | EN 1745 | 0,32 |
| Reazione al fuoco | EN 13501-1 | Euroclasse A1 |



Figura 4: Premiscelato Mapetherm ARI GG

1.2.2. **Rasobuild**

Il Rasobuild Eco Extrafino (Figura 5) è un intonachino di finitura minerale ecocompatibile, prodotto dall'azienda Kerakoll S.p.A., progettato per garantire finiture superficiali di elevata qualità con stabilità dimensionale. La sua scorrevolezza assicura una finitura liscia e un'applicazione rapida e sicura, ed è particolarmente indicato per supportare pitture e rivestimenti decorativi sia organici che minerali. È disponibile in bianco ed è idoneo per applicazioni su intonaci tradizionali o premiscelati nuovi o stagionati e su supporti assorbenti, conferendo ottima planarità.

Destinazione d'uso:

- Rasatura e lisciatura di intonaci tradizionali e premiscelati, vecchi e nuovi.
- Applicabile su fibrocemento, rasanti a grana grossa, fondi minerali compatti ed assorbenti, calcestruzzo.
- Idoneo per interni ed esterni in ambienti civili, commerciali e industriali.

Prima di procedere all'applicazione, è fondamentale preparare accuratamente il supporto, che deve essere compatto, asciutto e privo di impurità come polvere, residui di vernice o tracce di disarmante. Qualsiasi difetto o irregolarità deve essere eliminato per assicurare una finitura uniforme. Una volta preparato il supporto, è possibile procedere alla preparazione del prodotto, aggiungendo acqua nella misura del 45% circa rispetto al peso del Rasobuild (dalla scheda tecnica

≈ 9 L per 1 sacco da 20 kg). La miscela deve essere amalgamata con una frusta elicoidale a bassa velocità fino a ottenere una consistenza liscia e priva di grumi.

L'applicazione del prodotto inizia con la stesura di una prima mano su una superficie inumidita, utilizzando una spatola americana e applicando una forte pressione per garantire una perfetta adesione e rimuovere eventuali bolle d'aria. Le successive mani possono essere applicate fino a raggiungere lo spessore desiderato. Questo processo garantisce una finitura uniforme e di alta qualità, adatta a una vasta gamma di applicazioni edili (Tabella 3).⁸

Tabella 3: Caratteristiche Rasobuild

| | |
|------------------------------------|--|
| Massa volumica apparente | 1,06 kg/dm ³ |
| Acqua d'impasto | 9 L / 1 sacco 20 kg |
| Peso specifico impasto | 1,65 kg/dm ³ |
| pH impasto | ≥12 |
| Durata dell'impasto (pot life) | ≥4 |
| Temperatura limite di applicazione | Da +5 °C a +35 °C |
| Resa | ≈ 1,1 kg/m ² per mm di spessore |
| Resistenza a compressione a 28 gg | ≥ 3 N/mm ² (EN 1015-11) |



Figura 5: Premiscelato Rasobuild

1.2.3. CanapaMix3

Il CanapaMix3 (Figura 6) è un premiscelato realizzato dall'azienda Edilcanapa S.r.l.. La sua composizione si basa su calce idraulica naturale NHL 5, legno frantumato e additivi naturali. Si tratta di un intonaco altamente traspirante, con elevate proprietà di isolamento termico e capacità deumidificante, ideale per costruzioni che puntano alla sostenibilità (Tabella 4). La canapa, infatti,

⁸ Scheda tecnica Rasobuild https://products.kerakoll.com/yep-repository/kerakoll/media/Rbuild_e_extrafino_ITA_2024.pdf

è caratterizzata da una bassa energia incorporata e un'elevata capacità di assorbire CO₂ dall'atmosfera, il che rende CanapaMix3 una scelta ecologica e in linea con le attuali esigenze di costruzione sostenibile.

La preparazione dell'impasto avviene mescolando il premiscelato con acqua fino a ottenere una miscela omogenea e priva di grumi.

Le caratteristiche del prodotto una volta applicato includono:

- Riduce muffe e condense grazie all'elevata traspirabilità.
- Ideale anche per il restauro di edifici storici.
- Assorbe e rilascia umidità in eccesso.
- Ecologico a bassa energia incorporata.
- Applicabile su vecchi intonaci, previa verifica del supporto.
- Ottima resistenza a compressione.
- Inattaccabile da insetti, roditori, parassiti.
- A fine ciclo vita: rinnovabile, riciclabile, riutilizzabile.

Il CanapaMix3 rappresenta una soluzione efficace per interventi sia di nuova costruzione sia di restauro, con un'attenzione particolare all'efficienza energetica e alla sostenibilità ambientale.⁹

Tabella 4: Caratteristiche CanapaMix3

| | |
|---|--|
| Granulometria | 0-1 mm |
| Acqua d'impasto | 0,80-0,90 L/kg |
| Lavorabilità a 25°C | 45 minuti |
| Temperatura di applicazione | +5/+30 °C |
| Resa teorica | 11,25 kg/m ² per ogni cm di spessore |
| Resistenza a compressione | 2,48 N/mm ² (UNI EN 1015-11) |
| Reazione al fuoco | B - s1, d0 (UNI EN 13501-1:2019) |
| Resistenza diffusione vapore acqueo (μ) | ≤ 30 (28) - (UNI EN 1015 – 19) |
| Adesione | ≥ 0,21 N/mm ² Rottura tipo C (UNI EN 1015 – 12) |
| Conducibilità termica | 0,20 W/mK (UNI EN 10456) |
| Densità | 1125 kg/m ³ |
| Assorbimento d'acqua per capillarità | W 0 |

⁹ Scheda tecnica CanapaMix3 <https://www.edilcanapasrl.it/wp-content/uploads/2023/07/canapamix3-2023.pdf>



Figura 6: Premiscelato CanapaMix3

1.3. Finiture

1.3.1. Finiture UNIVPM

La finitura UNIVPM è un materiale sviluppato all'interno del progetto di ricerca “MAMMUT” da parte dell'Università Politecnica delle Marche. Di seguito la descrizione dei suoi componenti.

1.3.1.1. Calce Idraulica

La finitura UNIVPM è un materiale sviluppato con un legante a base di calce idraulica derivato dalla calcinazione di calcari marnosi o marne calcaree, contenenti circa l'11% di argille. Durante il processo di calcinazione, che avviene a circa 1000 °C, la componente argillosa produce ossidi di silicio e alluminio amorfi, fondamentali per attivare la reazione pozzolanica, che rappresenta un elemento chiave per conferire alla calce idraulica le sue proprietà peculiari.

In particolare, la reazione pozzolanica porta alla formazione di composti idrati che giocano un ruolo centrale nelle prestazioni della malta. In questa fase vengono generati il calcio silicato idrato (C-S-H), che è il principale responsabile della resistenza meccanica della malta, e il calcio alluminato idrato (C-A-H), che contribuisce ulteriormente alla durabilità e stabilità del materiale. Questo processo, noto come idratazione, permette alla calce di reagire con l'acqua, dando luogo a due fasi: la fase di presa, in cui l'impasto perde progressivamente fluidità diventando solido, e la fase di indurimento, che continua per settimane o mesi, durante la quale il materiale acquisisce resistenza meccanica.¹⁰

La calce utilizzata per la finitura UNIVPM è la Calix Blanca NHL 3,5 (Figura 7), una calce idraulica bianca naturale prodotta da Italcementi S.p.A., in Francia. La produzione avviene per calcinazione di calcari marnosi, senza aggiungere elementi correttivi che alterano la composizione naturale della roccia. Dopo la cottura, segue un lungo periodo di spegnimento e maturazione, rispettando le specifiche della norma UNI EN 459-1.

Le peculiarità della Calix Blanca includono una notevole facilità di utilizzo, sia manuale che meccanica, una plasticità e coesione eccellenti, e un lento processo di indurimento che rende le malte lavorabili a lungo, adattandosi facilmente ai vari supporti anche in presenza di piccoli movimenti strutturali. La finitura prodotta con questa calce offre inoltre una buona permeabilità all'aria, che permette ai muri di respirare, favorendo lo scambio di umidità e prevenendo la formazione di condensa, pur mantenendo un'adeguata impermeabilità all'acqua, rendendola

¹⁰ Collepardi, Collepardi, Troli, *Il nuovo calcestruzzo*, Ponzano Veneto, Tintoretto, 2009 (quinta edizione)

particolarmente adatta per l'uso in ambienti umidi o all'esterno. Inoltre, è apprezzata anche per la sua capacità di migliorare il comfort abitativo grazie alle proprietà di isolamento termico e acustico.

Le malte confezionate con questa calce mostrano un'eccellente resistenza al fuoco, garantendo sicurezza oltre al comfort. È utilizzata anche per malte, murature ecocompatibili, massetti isolanti e lavori di restauro conservativo.

Per la preparazione della malta, la calce viene miscelata con acqua e sabbia di granulometria adeguata a un tempo di almeno 3-5 minuti, utilizzando una betoniera da cantiere o miscelando a mano. Per ottenere un intonaco uniforme, si consiglia di applicare la malta in più strati, evitando spessori eccessivi che potrebbero causare colature, e di livellare la superficie in modo accurato. Se la malta viene utilizzata come allettamento per pietre naturali o laterizi, è importante bagnare i materiali prima della posa, per assicurare una migliore adesione (Tabella 5).

L'utilizzo della Calix Blanca rappresenta una soluzione di elevata qualità per l'edilizia, in particolare in progetti di restauro storico e bioedilizia, grazie alla sua resistenza, durabilità, lavorabilità e capacità di migliorare il comfort abitativo.¹¹

Tabella 5: Caratteristiche Calix Blanca NHL 3,5

| | |
|--------------------------------|----------|
| SO ₃ | 1,75% |
| CaO libera | 41,7% |
| Tempo inizio presa | 1053 min |
| Tempo fine presa | 1715 min |
| Acqua libra | 1,15% |
| Resistenza a compressione 28gg | 6,34 MPa |
| Espansione | 0,3 mm |



Figura 7: Calix Blanca NHL 3,5

¹¹ Scheda tecnica calce idraulica
https://www.heidelbergmaterials.it/sites/default/files/assets/document/6c/8c/scheda_tecnica_-_i.pro_calix_blanca_nhl_35.pdf

1.3.1.2. Silica gel

La silica gel, o silice colloidale, (Figura 8) è un polimero del biossido di silicio con formula chimica $(\text{SiO}_2)_x$. Si presenta come un solido bianco, amorfo e altamente poroso. In base alla dimensione dei pori, la silica gel può essere classificata in due tipi principali:

- Silica gel a pori fini: con pori di dimensioni inferiori a 1,5-2,0 nm.
- Silica gel a pori grossolani: con pori di dimensioni superiori a 4,0-5,0 nm.

La struttura molecolare conferisce al composto delle proprietà essiccanti, in quanto riesce ad assorbire l'umidità attraverso un processo chimico-fisico definito adsorbimento. La capacità adsorbente ed essiccante viene spesso sfruttata nel controllo locale dell'umidità poiché le molecole di vapore acqueo hanno la capacità di legarsi alla superficie della silica gel. La conformazione della silica gel è, quindi, caratterizzata da un'elevatissima porosità e superficie specifica e rende questo tipo di aggregato abile nella rimozione di composti organici volatili mediante il processo di adsorbimento.¹²

La conformazione del gel di silice, caratterizzata dalla sua elevatissima porosità e superficie specifica, rende questo materiale estremamente efficace nel migliorare le proprietà fisiche della malta, quali la capacità disidratante e la resistenza agli agenti atmosferici.

Per poter essere utilizzata come aggregato nella malta, la silica gel è stata macinata e setacciata fino a ottenere granuli con un diametro massimo di 300 μm . La macinazione è stata eseguita utilizzando un mulino a sfere, composto da due contenitori in ceramica riempiti con biglie. Queste biglie, insieme ai 2,5 kg di silica gel per ciascun contenitore, permettono la frantumazione del materiale. Il mulino è stato fatto funzionare per 2 ore e 20 minuti. Una volta completato il processo, la silica è stata setacciata manualmente usando setacci standardizzati da 300 μm per ottenere il materiale con la granulometria desiderata.



Figura 8: Silica gel macinata e setacciata

¹² Gel di silice: struttura, proprietà e usi <https://chimicamo.org/chimica-generale/gel-di-silice/>

1.3.1.3. Ceneri di biomassa

La cenere di biomassa (Figura 9) utilizzata è stata prodotta dall'azienda Epico Biomasse S.r.l. di Rieti. Queste derivano dalla combustione di materiali organici, come legno, residui agricoli e altre materie prime vegetali, e rappresentano un sottoprodotto potenzialmente utile in molte applicazioni sostenibili, in particolare nel settore delle costruzioni.

Per determinare la composizione delle ceneri di biomassa, è stata impiegata la tecnica XRD (diffrazione a raggi X – Grafico 1), che ha permesso di identificare sia le componenti cristalline sia quelle amorfe, evidenziando la presenza di composti come Portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), quarzo (SiO_2), ossido di calcio (CaO), carbonato di calcio (CaCO_3) e cloruro di potassio (KCl). Questi composti influenzano il comportamento reattivo delle ceneri e le loro applicazioni nei materiali da costruzione. L'uso delle ceneri di biomassa nelle costruzioni è in aumento per le loro proprietà sostenibili, contribuendo al miglioramento delle caratteristiche meccaniche delle malte attraverso la formazione di composti cementizi come il C-S-H.

Le ceneri di biomassa possono essere suddivise in due categorie principali in base alla dimensione delle particelle:

- **Bottom Ash:** sono le ceneri che si accumulano sul fondo della camera di combustione. Queste particelle tendono ad essere più grosse e, generalmente, non riescono a essere trasportate dal flusso di fumi.
- **Fly Ash:** si tratta delle ceneri leggere che vengono trasportate dal flusso dei gas di combustione. Le particelle sono molto fini e si disperdono facilmente, e per questo sono spesso catturate tramite filtri.

L'utilizzo di questi sottoprodotti nella composizione di malte e cementi rende possibile una maggiore sostenibilità dei materiali da costruzione, valorizzando residui altrimenti destinati allo smaltimento e riducendo l'impatto ambientale complessivo del settore edilizio.



Figura 9: Ceneri di biomassa: Bottom Ash (sinistra) e Fly Ash (destra)

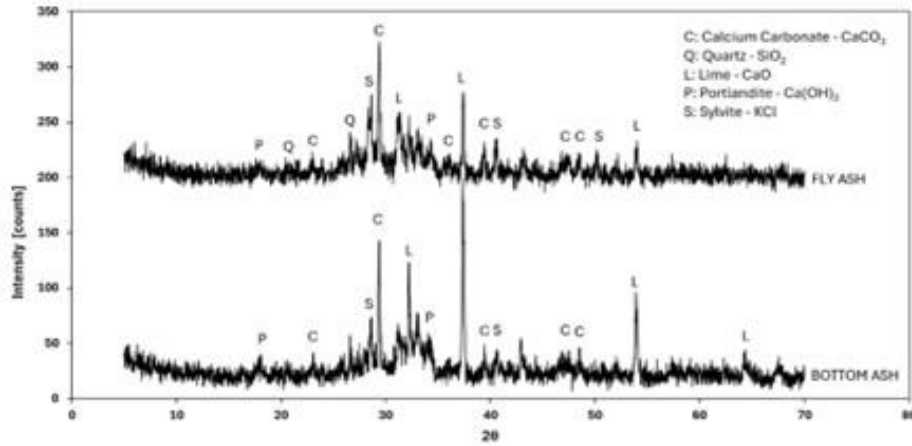


Grafico 1: Prova di caratterizzazione XRD Ceneri di biomassa

Bottom Ash

Le bottom ash sono un sottoprodotto industriale della combustione di biomasse nelle centrali termoelettriche, costituite da particelle più pesanti che si depositano alla base del forno. A causa della loro natura disomogenea e delle numerose impurità presenti, è necessaria un'analisi granulometrica seguita da un processo di setacciatura per valutarne e selezionarne le dimensioni.

L'analisi granulometrica consente di determinare la dimensione dei granuli di un materiale incoerente e può essere eseguita con due tecniche principali:

1. Setacciatura: utilizzata per particelle di dimensioni superiori a 150 μm , come ghiaie e sabbie. La serie di setacci può essere quella ASTM (fino a un diametro minimo di 150 μm) o la serie UNI (con un diametro minimo di 65 μm). I setacci hanno aperture quadrate di dimensioni decrescenti, e il materiale viene vagliato con un dispositivo vibrante per almeno 15 minuti, separando le diverse frazioni granulometriche.
2. Granulometria laser: usata per particelle più fini, con diametro tra 2 e 500 μm . Questa tecnica sfrutta il fenomeno della diffrazione di Fraunhofer, in cui le onde elettromagnetiche si diffondono quando incontrano ostacoli di dimensioni simili, permettendo così la misurazione delle particelle più piccole.

La procedura di setacciatura consiste nella preparazione del campione (bottom ash) per via secca. Prima del prelievo, è essenziale omogenizzare il campione, ad esempio utilizzando una sessola, per garantire la rappresentatività. Successivamente, si prende una quantità del campione, ad esempio 100 grammi, che viene quindi vagliato. La porzione trattenuta da ciascun setaccio viene pesata, e sulla base del peso iniziale del campione si calcolano il trattenuto percentuale, il trattenuto

cumulativo (Tabella 6) e l'indice della distribuzione granulometrica, noto come modulo di finezza (MF – Grafico 2).

Il modulo di finezza è un parametro che descrive la distribuzione delle dimensioni delle particelle di un aggregato, fornendo un'idea della granulometria generale del campione, utile per ottimizzare la miscelazione degli inerti nelle malte e nei cementi.¹³

Tabella 6: Analisi granulometrica

| Apertura (mm) | Massa trattenuta (g) | % trattenuto | % trattenuto cumulativo | % peso |
|-------------------|----------------------|--------------|-------------------------|--------|
| 8 | 46,2 | 4,6 | 4,6 | 95,4 |
| 4 | 8,6 | 0,9 | 5,5 | 94,5 |
| 2 | 12 | 1,2 | 6,7 | 93,3 |
| 1 | 26 | 2,6 | 9,3 | 90,7 |
| 0,5 | 88,1 | 8,8 | 18,1 | 81,9 |
| 0,25 | 175,9 | 17,6 | 35,6 | 64,4 |
| 0,125 | 350,4 | 35 | 70,6 | 29,4 |
| Passante 0,125 mm | 294 | 29,4 | 100 | |
| | 1001,1 | 100 | | |

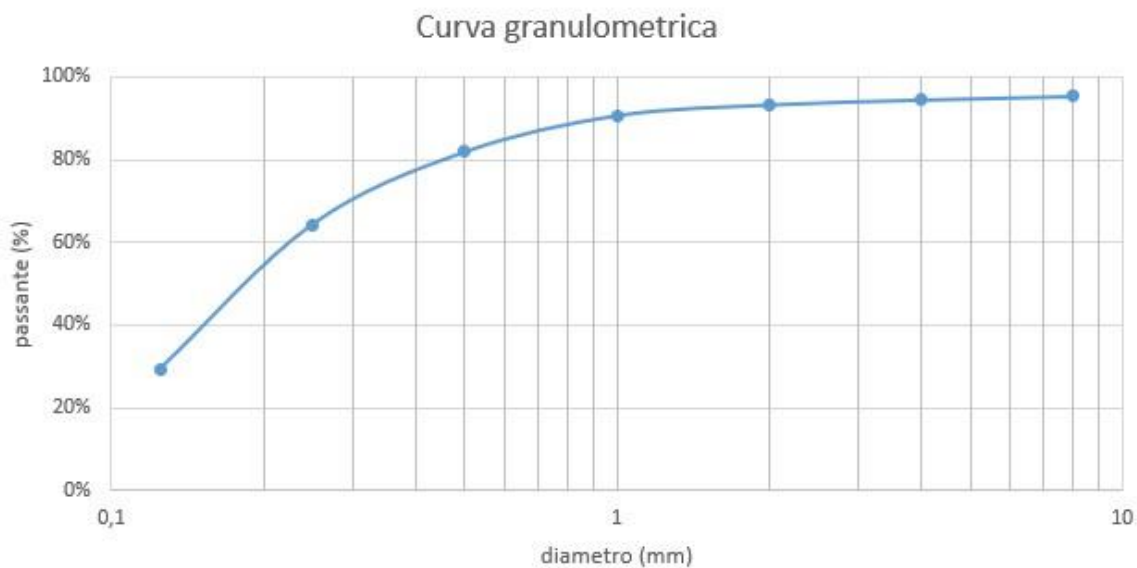


Grafico 2: Curva granulometrica in scala logaritmica della Bottom Ash

¹³ Collepardi, Collepardi, Troli, *Il nuovo calcestruzzo*, Ponzano Veneto, Tintoretto, 2009 (quinta edizione)

Una volta nota la distribuzione granulometrica delle bottom ash, queste devono essere ulteriormente lavorate per essere utilizzate come inerti. Il processo include macinazione e setacciatura, per ottenere una polvere uniforme e adeguata all'uso nella malta.

La macinazione consiste nella polverizzazione delle ceneri tramite l'impatto e l'attrito tra le biglie in ceramica, di varie dimensioni, e la parete interna della giara. Questo processo crea un effetto a cascata che riduce il materiale a una polvere finissima. Per il campione di bottom ash caratterizzato e ripulito dalle impurità, la macinazione è stata effettuata con un mulino a biglie per 45 minuti, seguita dalla setacciatura con un setaccio di 500 μm per garantire una granulometria omogenea.

Per iniziare la macinazione, due giare (con pesi iniziali di 22,159 kg e 24,046 kg) sono state parzialmente riempite con ceneri e biglie di ceramica (Figura 10). Le giare sono state poi montate su due alberi di trasmissione e la macchina (Figura 11) è stata fatta girare, mantenendo una velocità di rotazione sotto la soglia che avrebbe causato alle biglie di ruotare lungo il bordo del cilindro senza causare una macinazione efficace.

Dopo la macinazione, le ceneri sono state separate dalle biglie e setacciate (Figura 12). Al termine di questo processo, il peso residuo delle ceneri lavorate era di 20,155 kg. A questo punto, le bottom ash sono pronte per essere utilizzate nella realizzazione della malta, apportando potenziali benefici come sostenibilità e miglioramento delle proprietà meccaniche.



Figura 10: Giara e biglie per la macinazione



Figura 11: Mulino a biglie

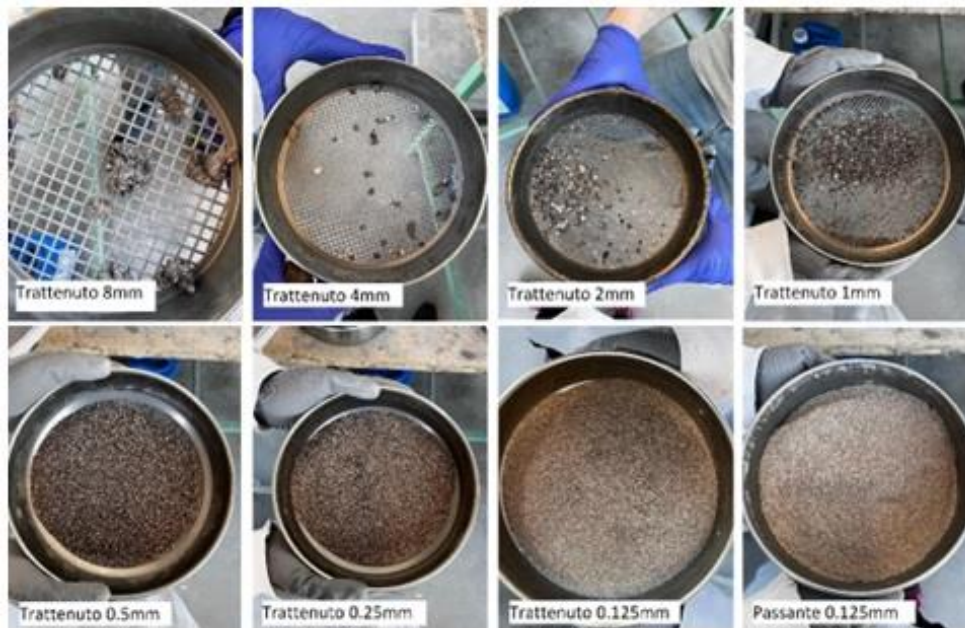


Figura 12: Trattenuto ai setacci

Fly Ash

La cenere volante, comunemente nota come fly ash, è costituita da particelle fini prodotte durante la combustione della biomassa nelle centrali termoelettriche. Queste particelle vengono catturate dai sistemi di filtrazione dei gas di scarico per evitare il loro rilascio nell'atmosfera.

Le fly ash sono caratterizzate da particelle con un diametro massimo inferiore a 0,063 millimetri, una densità di 1,41 g/cm³, e una capacità di assorbimento d'acqua del 49%. Queste caratteristiche le rendono potenzialmente adatte per diverse applicazioni industriali, inclusi materiali da costruzione

come il cemento e le malte, dove possono contribuire a migliorare alcune proprietà del materiale, tra cui la lavorabilità e la sostenibilità ambientale.

1.3.1.4. Additivi

Gli additivi sono prodotti chimici aggiunti in quantità nettamente inferiori rispetto agli altri costituenti, con percentuali di 1-2-3% in peso di legante. Nonostante il basso dosaggio modificano di molto le proprietà dei conglomerati sia allo stato fresco che indurito.

Cellulosa

La cellulosa viene aggiunta alle malte per migliorare diverse proprietà che ne facilitano la lavorazione e ne aumentano le prestazioni complessive. Si tratta di un polimero naturale ottenuto principalmente da legno e piante. Attraverso trattamenti chimici, la cellulosa può essere trasformata in derivati come l'etere di cellulosa, che presenta caratteristiche ideali per l'impiego nei materiali da costruzione.

I principali benefici dell'aggiunta di cellulosa alle malte sono:

- **Ritenzione d'acqua:** la cellulosa contribuisce a trattenere l'acqua all'interno della malta durante il processo di asciugatura, riducendo la velocità di evaporazione. Questo accorgimento è fondamentale per prevenire la formazione di crepe e aumentare la resistenza finale del materiale.
- **Lavorabilità:** la cellulosa migliora la consistenza della malta, rendendola più facile da applicare e da lavorare. Questo è particolarmente vantaggioso nelle applicazioni di intonaco e stucco.
- **Aderenza:** aumenta la capacità della malta di aderire ai substrati, garantendo una maggiore stabilità e durabilità delle applicazioni.
- **Resistenza agli agenti atmosferici:** la cellulosa può migliorare la resistenza della malta all'acqua e al gelo, incrementando così la durabilità delle costruzioni che sono esposte agli agenti atmosferici.

L'uso della cellulosa nelle malte è una pratica consolidata che contribuisce a migliorare la qualità e la durata del materiale. La scelta del tipo specifico di derivato di cellulosa dipende dalle esigenze specifiche dell'applicazione e dalle caratteristiche richieste dalla malta.¹⁴

¹⁴ <https://www.kimachemical.com/it/news/what-is-cellulose-ether>

Nel caso della finitura UNIVPM, la cellulosa utilizzata è fornita da Quimialmel-Italia S.p.A. (Figura 13). La sua inclusione garantisce una maggiore qualità nelle prestazioni della malta, aumentando sia la facilità di applicazione che la resistenza strutturale delle costruzioni.



Figura 13: Cellulosa Quimialmel-Italia S.p.A.

Superfluidificante

I superfluidificanti sono additivi essenziali nelle malte e nei calcestruzzi, utilizzati per migliorare la fluidità e la lavorabilità delle miscele senza aumentare il contenuto d'acqua. Questi additivi contribuiscono a ottenere una miscela più facile da applicare, migliorando al contempo le proprietà meccaniche e la durabilità del materiale finale. Uno dei principali benefici è la riduzione del rischio di fessurazioni dovute al ritiro plastico e idraulico.

Negli anni '70, i fluidificanti erano generalmente a base di lignosolfonato, un sottoprodotto dell'estrazione della cellulosa dal legno. Successivamente, vennero introdotti i superfluidificanti sintetici, che offrono prestazioni superiori fino a quattro volte rispetto ai fluidificanti tradizionali.

I superfluidificanti migliorano la lavorabilità della miscela principalmente tramite tre meccanismi:

- **Dispersione delle particelle:** i fluidificanti riducono le forze di attrazione tra le particelle di cemento, migliorando la loro dispersione. Questo permette una idratazione più uniforme e un aumento della fluidità complessiva.
- **Riduzione della tensione superficiale:** alcuni fluidificanti abbassano la tensione superficiale dell'acqua, facilitando la lavorabilità della miscela e riducendo la necessità di un eccessivo contenuto d'acqua.
- **Effetto lubrificante:** formano un film sottile attorno alle particelle di cemento, migliorando lo scorrimento reciproco tra le particelle e rendendo la miscela più facile da manipolare.

La scelta del tipo di superfluidificante e del dosaggio corretto dipende da vari fattori come le specifiche esigenze del progetto, le condizioni ambientali e le caratteristiche desiderate per il

materiale finale. Un uso appropriato dei superfluidificanti permette di ottenere miglioramenti significativi in termini di qualità, durabilità e sostenibilità delle costruzioni.¹⁵

Nel caso della finitura UNIVPM, il superfluidificante utilizzato è il Melment F10 (Figura 14), prodotto dall'azienda Basf SE, che offre prestazioni elevate, garantendo una maggiore lavorabilità e resistenza meccanica del materiale finale.



Figura 14: Superfluidificante Melment F10

Antiritiro

Per risolvere i problemi legati alla mancata stagionatura umida, che portano alla fessurazione della finitura UNIVPM, sono stati introdotti additivi nell'impasto al momento del confezionamento. Questi additivi antiritiro, noti anche come SRA (Shrinkage Reducing Admixtures), sono costituiti principalmente da glicoli e polioli, i quali riducono il ritiro igrometrico e plastico causato dall'evaporazione dell'acqua durante le fasi di indurimento e freschezza del materiale.

Il fenomeno del ritiro legato all'asciugamento è particolarmente problematico durante la fase plastica del materiale, in cui la resistenza meccanica a trazione è pressoché assente, rendendo il materiale vulnerabile alla formazione di fessure.

Per prevenire queste problematiche, oltre all'uso degli additivi, la superficie della malta viene protetta mediante una pellicola protettiva, applicata per un periodo variabile da 3 a 7 giorni, fino al raggiungimento di una resistenza adeguata della malta (≥ 1 MPa). Questo metodo aiuta a ridurre l'evaporazione dell'acqua, favorendo una corretta stagionatura e diminuendo il rischio di formazione di crepe.

¹⁵ Collepari, Collepari, Troli, *Il nuovo calcestruzzo*, Ponzano Veneto, Tintoretto, 2009 (quinta edizione)

Gli SRA influenzano non solo il ritiro da essiccamento, ma possono anche avere un impatto su altre proprietà del materiale, come la resistenza meccanica e il modulo di elasticità, richiedendo una valutazione attenta dei loro effetti sull'intera miscela.¹⁶

L'additivo specifico utilizzato per la finitura UNIVPM è il Metolat P 872 (Figura 15), prodotto dalla MÜNZING Chemie, una miscela a base di alcoli alifatici, glicoli e componenti organiche. Questo additivo si presenta sotto forma di polvere bianca e deve essere miscelato o diluito con acqua prima dell'applicazione, migliorando le proprietà della malta e contribuendo a ridurre i fenomeni di ritiro durante l'essiccazione.

Il dosaggio tipico varia tra lo 0,5% e il 5,0% del totale della miscela, ma la concentrazione ottimale dipende dalle specifiche del sistema cementizio utilizzato e deve essere testata per ottenere i risultati desiderati.¹⁷

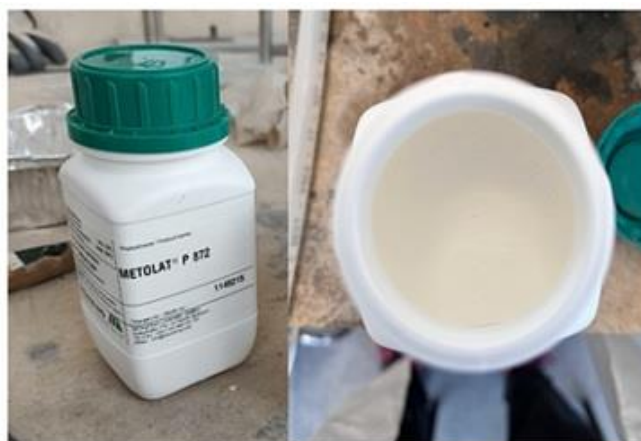


Figura 15: Antiritiro Metolat P 872

Biossido di titanio

AEROXIDE TiO₂ P 25 (Figura 16), prodotto da Evonik Industries AG, è un biossido di titanio idrofilo puro (TiO₂) con una superficie specifica molto elevata (Tabella 7). Grazie alla sua unica combinazione di strutture cristalline di Anatase e Rutilo, è indicato per numerose applicazioni, in particolare quelle di natura catalitica e fotocatalitica. Inoltre, è consigliato come filtro UV molto efficiente, offrendo una protezione significativa contro la radiazione ultravioletta.

Per l'uso il dosaggio suggerito è compreso tra 0,5% e 10% del totale della formulazione, a seconda delle specifiche esigenze del prodotto.

¹⁶ Collepari, Collepari, Troli, *Il nuovo calcestruzzo*, Ponzano Veneto, Tintoretto, 2009 (quinta edizione)

¹⁷ Scheda tecnica Metolat P 872

https://www.munzing.com/static/721d050a1ec2e38824665f4882bc238f/td_METOLAT_P_872_EN_5b026c6688.pdf

Il biossido di titanio è ideale per ottenere un efficace effetto fotocatalitico, oltre a conferire proprietà autopulenti in rivestimenti minerali. Le sue applicazioni speciali includono l'utilizzo in vari tipi di rivestimenti per migliorare le performance fotocatalitiche, che si traducono in superfici più pulite e protette da contaminazioni organiche.¹⁸

Tabella 7: Dati tecnici biossido di titanio

| | |
|--------------------------------|---------------------------|
| Aspetto | Bianco |
| Perdita all'essiccamento | < 1,5% |
| Valore pH | 3,5-4,5 |
| Contenuto di SiO ₂ | < 0,2 % |
| Superficie specifica (BET) | 35 - 65 m ² /g |
| Densità del prodotto compresso | circa 140 g/L |



Figura 16: Biossido di titanio

¹⁸ Scheda tecnica biossido di titanio

<https://products.evonik.com/assets/or/ld/AEROXIDE TiO2 P 25 TDS IT IT TDS PV 52043891 it IT WORLD.pdf>

1.3.2 Pitture commerciali

1.3.2.1 Keradecor White Plus

Keradecor White Plus (Figura 19) è una pittura sviluppata da Kerakoll S.p.A. per offrire elevate prestazioni in termini di protezione, durabilità ed estetica, contribuendo alla sostenibilità edilizia. Questo prodotto è formulato come una pittura organica minerale, a base di resine stirolo-acriliche all'acqua, e fa parte della gamma di materiali per la costruzione ecocompatibili di alta qualità che non necessita di fissativo su supporti non particolarmente porosi/degradati.

Caratteristiche principali (Tabella 8):

- **Salubrità e Sostenibilità:** la pittura è composta da minerali naturali e include additivi antimuffa, contribuendo a creare un ambiente interno sano, privo di sostanze nocive.
- **Estetica:** offre una finitura bianca uniforme e coprente che riduce il numero di mani necessarie.
- **Facilità di Applicazione:** la pittura può essere applicata facilmente con pennello o rullo.
- **Versatilità:** indicato per una vasta gamma di superfici, adattabile a diverse tipologie di ambienti e condizioni.
- **Proprietà Tecniche:** semi-lavabile e traspirante, buona resistenza all'abrasione e agli agenti atmosferici, è durabile anche in contesti esterni.¹⁹

Tabella 8: Dati tecnici pittura Keradecor White Plus

| | |
|--|-------------------------------------|
| Massa volumetrica | ≈ 1,62 kg/L |
| Viscosità | ≈ 35000 cps, rotore 6 RPM 10 metodo |
| Temperature limiti di applicazione | da +5 °C a +30 °C |
| Tempo di attesa tra le mani successive | ≥ 6 h |
| Diluizione con acqua | 30 – 40% in volume |
| Permeabilità al vapore acqueo | Classe V1 (alta) |



Figura 17: Pittura Keradecor White Plus

¹⁹ Scheda tecnica Keradecor White Plus https://products.kerakoll.com/yep-repository/kerakoll/media/Kdec_white_plus_ITA_2024.pdf

1.3.2.2 Pittura Iris Color

La pittura murale traspirante di Iris Color (Figura 20) è una soluzione progettata per gli interni e confezionata in un formato da 14 litri. Questa pittura è pronta all'uso e a base d'acqua che non necessita di diluizioni, offrendo un'applicazione semplice e veloce.

Caratteristiche principali (Tabella 9):

- Applicazione: facile da applicare, sia con pennello che con rullo. È particolarmente versatile, adatta a diverse superfici interne e perfetta per ambienti umidi come bagni e cucine.
- Finitura Estetica: la pittura presenta un aspetto opaco che aiuta a nascondere le imperfezioni delle pareti, fornendo una finitura uniforme e gradevole.
- Salubrità e Sostenibilità: traspirante, riduce la formazione di condensa e muffe. Ha un'emissione di COV di 9 g/l e classificata A+ per le emissioni negli ambienti interni.
- Permeabilità al Vapore Acqueo: la pittura è traspirante, consentendo il passaggio di vapori e umidità, ideale per ambienti soggetti a condensa.²⁰

Tabella 9: Dati tecnici pittura Iris Color

| | |
|--|---------------------------|
| Massa volumetrica | ≈ 1,63 kg/L |
| Viscosità | 13,000÷14,000mPa s a 20°C |
| Temperature limiti di applicazione | da +5 °C a +30 °C |
| Tempo di asciugatura al tatto | ≈ 2 h |
| Tempo di attesa tra le mani successive | ≈ 3 h |



Figura 18: Pittura Iris color

²⁰ https://www.leroymerlin.it/prodotti/vernici/pitture-per-interni/pittura-bianca/pittura-bianca-per-interni-14-l/pittura-per-interni-traspirante-iris-color-bianco-opaco-14-l-81990256.html?at_medium=Sea-Paid&at_source=Google&at_section=Vernici&at_campaign=LM_Cr.Vernici_Sea-Paid_Google_Pmax_Conversion_AO_Conversion&gad_source=1&gclid=Cj0KCCQjwjNS3BhChARIsAOxBM6qHxQW8PbbH8Ex5fNLYIhUMtW6GhY9iSDp8Yg8D0yd_HJTpidMxpmUaAn7vEALw_wcB

1.4 Primers

1.4.1 Canaprimer

Canaprimer (Figura 17) è un fissativo traspirante all'acqua prodotto da Edilcanapa S.r.l., progettato per migliorare l'adesione tra CanapaMix3 e la finitura UNIVPM. È particolarmente indicato per il trattamento di superfici come intonaci premiscelati, deumidificanti, assorbenti o sfarinanti. È adatto sia per uso interno che esterno, grazie alle sue proprietà idrorepellenti e traspiranti.

Le caratteristiche del Canaprimer sono:

- **Composizione:** prodotto incolore con alta capacità di penetrazione nel supporto, con eccellente permeabilità al vapore acqueo.
- **Impiego:** adatto per consolidare superfici esterne, soprattutto se presentano finiture silossaniche, e per aumentare l'adesione su superfici assorbenti o sfarinanti, regolando il loro assorbimento.
- **Diluizione:** si consiglia di diluirlo in rapporto 1:1 con acqua potabile prima dell'applicazione.
- **Applicazione:** il prodotto può essere applicato con pennello, rullo, o spray.
- **Temperatura d'uso:** la temperatura ideale va da +5 °C a +30 °C.
- **Essiccazione:** asciuga al tatto dopo 1 ora e può essere ricoperto dopo 8 ore.
- **Resa:** circa 5-10 m²/l, in base al tipo di supporto e alla diluizione utilizzata.

I prodotti della gamma Canaprimer rispettano la normativa COV 2010, garantendo quindi un basso impatto ambientale. Questa conformità assicura l'uso di materiali rispettosi dell'ambiente, rendendo il Canaprimer una scelta ideale per progetti edilizi sostenibili.²¹



Figura 19: Canaprimer

²¹ <https://edilcanapasrl.it/canaprimer-fissativo-traspirante-e-idrorepellente-per-interni-ed-esterni/>

1.4.2 Fissativo per pittura Iris Color

Il Luxens Fissativo Interni PP (Figura 18) venduto da Leroy Merlin è un primer fissativo specifico per preparare superfici interne prima della pittura. È ideale per migliorare l'adesione della pittura Iris Color su supporti porosi come cartongesso, intonaci o superfici sfarinate, uniformando l'assorbimento e riducendo la formazione di polvere. Questo prodotto facilita l'applicazione della pittura successiva, garantendo un risultato più omogeneo e duraturo. È adatto per uso esclusivamente interno ed è facilmente applicabile con pennello, rullo o spruzzo.

Le caratteristiche del fissativo sono:

- **Composizione:** miscela con 5-cloro-2-metil-2H-isotiazol-3-one e 2-metil-2H-isotiazol-3-one (3:1). Prodotto liquido biancastro, idrosolubile, pH di circa 7,5, densità di $1,000 \pm 0,020$.
- **Impiego:** fissativo all'acqua, adatto per usi di consumo e per preparare le superfici interne come cartongesso o muri prima della verniciatura.
- **Diluizione:** si consiglia di diluirlo in rapporto 1:2 con acqua potabile prima dell'applicazione.
- **Applicazione:** il prodotto va applicato preferibilmente con pennello.
- **Temperatura d'uso:** non applicare con temperature inferiori ai 5°C.
- **Essiccazione:** asciuga al tatto dopo 2 ore e può essere ricoperto dopo 6 ore.
- **Resa:** $4l \pm 160m^2$ per singola mano.²²



Figura 20: Fissativo Luxens

²² Scheda tecnica fissativo <https://www.leroymerlin.it/prodotti/vernici/preparazione-del-fondo-e-stucchi/fondi-e-fissativi/fissativo-per-pittura-su-legno-e-intonaco-di-calce-cementizia-e-cartongesso-isolante-base-acqua-1-l-36101233.html>

1.5 Resina per prove Pull-off

La resina utilizzata è la Elan-tech MC256/W256 ed è un sistema epossidico bicomponente (CARBOSTRUCTURA A e CARBOSTRUCTURA B – Figura 21) e tissotropico a media viscosità, sviluppato per l'incollaggio strutturale e l'impregnazione di tessuti nella Linea Consolidamento TCS. Questo sistema viene utilizzato nel consolidamento CARBO-STRUCTURA con compositi FRP (classe 210C, CIT n. 492/2017) e risponde ai requisiti della normativa EN1504-4.

Le caratteristiche principali di questo materiale sono:

- Applicabilità versatile: può essere impiegato per diverse problematiche strutturali, incluse superfici verticali e sopra testa.
- Facile applicazione: non richiede primer, ha un rapporto di miscelazione resina-indurente di 2:1 in peso ed è facile da miscelare e applicare.
- Elevata adesione: garantisce una forte adesione su vari materiali da costruzione.
- Resistenza meccanica: offre elevate prestazioni di resistenza ai carichi.
- Velocità di installazione: riduce le tempistiche di posa rispetto a tecnologie tradizionali.

Il sistema Elan-tech MC256/W256 è indicato per il consolidamento e il rinforzo di strutture in laterizio, cemento armato (c.a.), pietrame, mattoni pieni, acciaio e legno, su superfici verticali, orizzontali e oblique.

Le modalità per l'applicazione di quest'ultima sono:

- Miscelazione: eseguire la miscelazione meccanicamente (a basso numero di giri) o manualmente fino a ottenere una completa omogeneizzazione dei due componenti in rapporto 2:1 in peso, cioè una parte di CARBOSTRUCTURA A e due parti di CARBO-STRUCTURA B.
- Applicazione: con rullo, pennello o spatola, senza necessità di primer. Le superfici devono essere asciutte, pulite e ripristinate rimuovendo eventuali parti incoerenti. La temperatura di applicazione è compresa tra + 10 °C e + 30 °C.
- Il tempo di indurimento varia a seconda della temperatura, così come il tempo di lavorabilità (Tabella 10).²³

²³ https://www.aterrium.it/wp-content/uploads/2023/02/Scheda_tecnica_Elan-tech_MC256W256.pdf

Tabella 10: Temperature di lavorabilità e indurimento della resina bicomponente

| | |
|----------------------|-------------|
| Lavorabilità a 10 °C | 85 – 95 min |
| Lavorabilità a 20 °C | 35 – 40 min |
| Lavorabilità a 30 °C | 15 min |
| Indurimento a 10 °C | 15 gg |
| Indurimento a 20 °C | 5 gg |
| Indurimento a 30 °C | 3 gg |



Figura 21: Componenti resina CARBOSTRUCTURA A e CARBOSTRUCTURA B

Capitolo 2

PREPARAZIONE PROVINI

2.1 Taglio supporti in XPS

Dalla lastra originale in XPS sono stati ricavati supporti di diverse dimensioni e forme (Figura 22) per condurre le seguenti prove sperimentali (Tabella 11):

Tabella 11: Prove di caratterizzazione da eseguire

| PROVE DI CARATTERIZZAZIONE | DIMENSIONE PROVINO (cm) | N° PROVINI |
|--|-------------------------|------------|
| Resistenza meccanica | 4x4x16 | 3 |
| Permeabilità al vapore | D=16,8 | 3 |
| MBV (Moisture Buffer Value) | 15x15 | 3 |
| Adsorbimento VOCs (Composti Organici Volatili) | 7x7 | 3 |
| NOx Inquinamento da ossidi di azoto | 7x7 | 3 |
| Pull-off/ Aderenza | D=5 | 5 |
| Conducibilità termica | 30x30 | 1 |

La preparazione accurata dei provini è stata una fase fondamentale, poiché un'adeguata preparazione garantisce la riproducibilità e l'affidabilità delle prove, consentendo di ottenere dati realistici e utilizzabili sulle proprietà delle malte.



Figura 22: Supporti in XPS ritagliati

Per migliorare le prestazioni delle malte applicate sui provini di XPS e ottimizzare le proprietà meccaniche e fisiche del sistema, è stato utilizzato un rinforzo in fibra di vetro alcali resistente a metà spessore di Mapetherm, commercializzato dalla Kerakoll S.p.A. con il nome di Rinforzo V 50 avente una maglia di 4 mm x 4 mm (Figura 23). Questo tipo di rinforzo è appositamente progettato per essere integrato nei sistemi termoisolanti a cappotto.

Il rinforzo V 50 contribuisce a migliorare diverse caratteristiche del sistema, come l'elasticità, la compattezza e la resistenza alle temperature critiche d'esercizio, garantendo una maggiore durabilità del rivestimento. Inoltre, elimina i problemi di crepe o fessurazioni derivanti da alterazioni dinamiche, stabilizzando l'intera struttura anche in condizioni di variazione termica o meccanica.²⁴

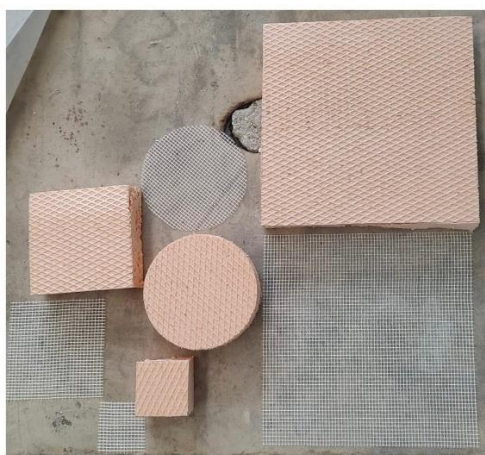


Figura 23: Supporti in XPS con rete di armatura V50

²⁴ Scheda tecnica rinforzo V50 Kerakoll <https://products.kerakoll.com/it-IT/p/rinforzo-v-50>

2.2 Taglio supporti in Canapa

Da questo pannello, è stato possibile ricavare supporti delle stesse dimensioni delle lastre in XPS, con lo scopo di eseguire le seguenti prove di caratterizzazione (Tabella 12):

Tabella 12: Prove di caratterizzazione da eseguire

| PROVE DI CARATTERIZZAZIONE | DIMENSIONE PROVINO (cm) | N° PROVINI |
|--|-------------------------|------------|
| Resistenza meccanica | 4x4x16 | 3 |
| Permeabilità al vapore | D=16,8 | 3 |
| MBV (Moisture Buffer Value) | 15x15 | 3 |
| Adsorbimento VOCs (Composti Organici Volatili) | 7x7 | 3 |
| NOx Inquinamento da ossidi di azoto | 7x7 | 3 |
| Pull-off/ Aderenza | D=5 | 5 |
| Conducibilità termica | 30x30 | 1 |
| Fessurazione | 60x110 | 1 |

Anche in questo caso è stato necessario tagliare e rifilare la rete di armatura, GLASSTEX GT 140 KF prodotta dalla ditta Biemme S.r.l., inserita a metà spessore di CanapaMix3, per adattarla al pannello e garantire una copertura omogenea (Figura 24). La rete di armatura gioca un ruolo cruciale, fornendo stabilità e prevenendo danni dovuti a sollecitazioni meccaniche e termiche. Le sue funzioni sono:

1. Assorbimento delle sollecitazioni: contrasta il ritiro dovuto all'essiccazione.
2. Distribuzione degli sforzi: dovuti a variazioni di temperatura e umidità.
3. Prevenzione delle fessurazioni: evita la concentrazione degli sforzi, riducendo le fessure.



Figura 24: Supporti in canapa ritagliati

2.3 Preparazione profili per il getto

Dopo aver preparato i supporti di diverse dimensioni, sia in XPS che in canapa, e le relative armature, si è proceduto a realizzare dei profili da fogli in acetato con sei altezze differenti: 4,25 cm, 4,50 cm, 4,65 cm, 4,80 cm, 4,95 cm e 5,1 cm (Figura 25).



Figura 25: Profili in acetato

Ciascuno di questi spessori corrisponde all'altezza degli strati delle varie malte applicate e vengono inseriti sui supporti per agevolare la stesura (Figura 26).



Figura 26: Supporti e profili

Le combinazioni (Mapetherm, Rasobuild, CanapaMix3 e UNIVPM) sono così distribuite:

1. **Pannello commerciale XPS più finitura commerciale (XPS + PAINT KERADECOR WHITE PLUS / XPS + PAINT IRIS COLOR – Figura 27):** composto da uno strato di premiscelato Mapetherm di 5 millimetri, a sua volta suddiviso in un primo strato di 2,5 mm, con armatura in fibra di vetro e un secondo strato di 2,5 mm, uno strato di premiscelato Rasobuild di 3 millimetri, rispettivamente suddiviso in due strati ciascuno di 1,5 mm, e infine uno strato di pittura a rullo Keradecor White Plus o Iris Color.

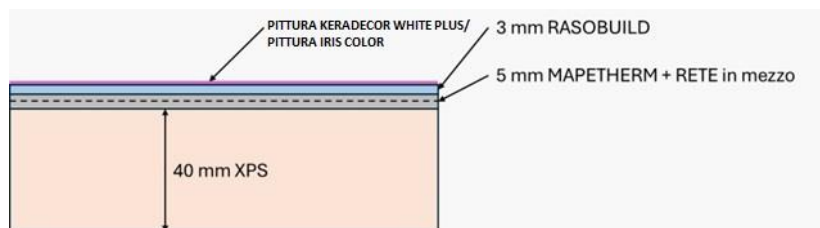


Figura 27: Stratigrafia campione XPS+PAINT

2. **Pannello commerciale XPS più finitura UNIVPM (XPS + UNIVPM – Figura 28):** composto da uno strato di premiscelato Mapetherm di 5 mm, a sua volta suddiviso in un primo strato di 2,5 mm, con armatura, un secondo strato di 2,5 mm, uno strato di premiscelato Rasobuild di 3 mm, rispettivamente suddiviso in due strati ognuno di 1,5 mm e infine uno strato con finitura UNIVPM.

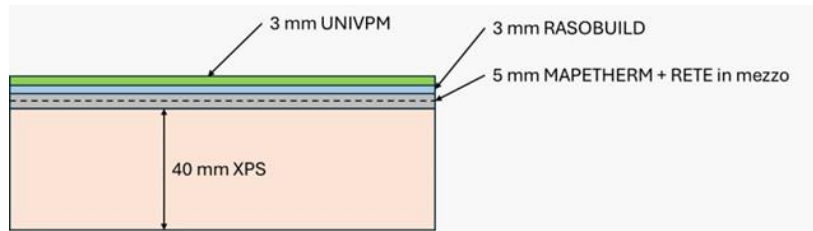


Figura 28: Stratigrafia campione XPS+UNIVPM

3. **Pannello in canapa più finitura commerciale (HEMP + PAINT KERADecOR WHITE PLUS / HEMP + PAINT IRIS COLOR – Figura 29):** composto da un primo strato di premiscelato CanapaMix3 di 8 mm, suddiviso in un primo strato da 2,5 mm con successiva applicazione dell'armatura in polietilene riciclato e un secondo strato, di 5,5 mm. Prima di stendere la pittura a rullo Keradecor White Plus o Iris Color viene applicato uno strato di Canaprimer.

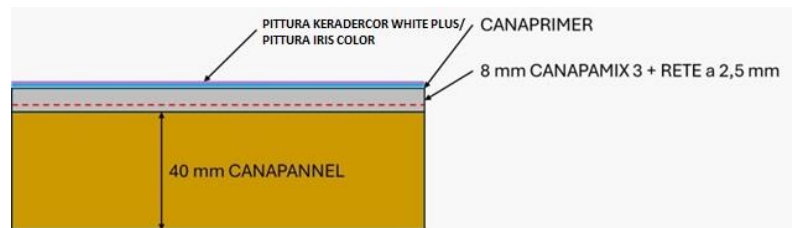


Figura 29: Stratigrafia campione HEMP+PAINT

4. **Pannello in canapa più finitura UNIVPM (HEMP+UNIVPM – Figura 30):** composto da un primo strato di premiscelato CanapaMix3 di 8 mm, suddiviso in un primo strato da 2,5 mm con successiva applicazione dell'armatura in polietilene riciclato e un secondo strato, di 5,5 mm. Prima di stendere lo strato di finitura UNIVPM suddiviso in due strati ciascuno di 1,5 mm, viene applicato uno strato di Canaprimer.

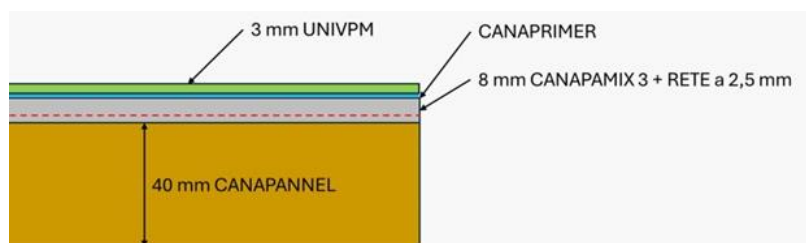


Figura 30: Stratigrafia campione HEMP+UNIVPM

2.4 Getti di prova delle miscele

Prima del confezionamento delle miscele destinate alle prove di caratterizzazione, sono state realizzate delle miscele di prova. Questo passaggio è fondamentale per garantire che i materiali e i processi siano corretti e ottimizzati.

2.4.1 Mapetherm

La miscela Mapetherm AR1 GG è stata preparata aggiungendo 462 g di acqua (pari al 22% in peso) a 2100 g di premiscelato. Dopo la realizzazione dell'impasto, ancora fresco, è stata eseguita la prova di lavorabilità. La lavorabilità di una malta è una caratteristica fondamentale che ne determina la facilità di applicazione, nonché la capacità di riempire e aderire ai vuoti senza segregazione o perdita eccessiva di acqua. Valutare e ottimizzare la lavorabilità è cruciale per garantire che la malta possa essere applicata efficacemente in situazioni reali.

Tra i diversi metodi per misurare la lavorabilità, il più utilizzato è lo slump test, che consiste nel misurare lo spandimento del materiale una volta rimosso da un tronco di cono metallico, rispetto alle dimensioni del materiale stesso costipato all'interno del cono dopo 15 colpi, come specificato dalla normativa UNI EN 1015-3 (Figura 31). Tutte le malte sono state confezionate cercando di ottenere una consistenza rigida, con uno spandimento inferiore a 140 mm.



Figura 31: Prova di lavorabilità Mapetherm, media dello spandimento 12,3 cm

Una volta eseguita la prova di lavorabilità, si procede al riempimento delle casseforme. Dopo aver montato e sigillato accuratamente il cassero, questo viene trattato con un disarmante (Figura 32) per prevenire l'adesione della malta alla superficie dello stampo. Il disarmante, noto anche come distaccante per casseforme, è una sostanza applicata sulle superfici delle casseforme per facilitare la loro rimozione una volta che la malta si è indurita. L'uso del disarmante è fondamentale per ottenere una buona finitura superficiale della malta e per evitare danni sia alle casseforme sia al materiale indurito durante il disarmo.



Figura 32: Disarmante

L'impasto viene poi distribuito all'interno della cassaforma di dimensioni 4 cm x 4 cm x 16 cm (Figura 33) con l'ausilio di una cazzuola e compattato utilizzando una tavola vibrante, uno strumento fondamentale per garantire l'assestamento corretto della miscela e ottenere la massima densità possibile.



Figura 33: Cassero per prova di resistenza meccanica con malta Mapetherm

Dopo questa fase, la superficie superiore del provino viene accuratamente livellata utilizzando appositi staggi e fratazzi ed infine, il tutto, viene avvolto nella pellicola per evitare l'evaporazione dell'acqua e la conseguente formazione di fessure. I provini devono rimanere nelle casseforme per un periodo compreso tra le 16 ore e non oltre 3 giorni, con temperatura di 20 ± 5 °C all'interno di apposite celle di stagionatura.

Le celle di stagionatura sono ambienti controllati progettati per garantire condizioni costanti di temperatura e umidità, necessarie per una corretta idratazione e indurimento dei materiali. Nel nostro caso, la temperatura è mantenuta a 20 ± 1 °C, un intervallo critico per garantire il corretto processo di idratazione delle malte. Le celle sono anche progettate per mantenere un'elevata umidità relativa, solitamente tra il 95% e il 100%, prevenendo la perdita di acqua che potrebbe

causare fessurazioni e compromettere la resistenza finale del materiale. Esse sono ben isolate per evitare scambi termici con l'ambiente esterno, garantendo così condizioni interne stabili e uniformi. Nel nostro caso, la cella di stagionatura mantiene un'umidità relativa pari al $50 \pm 5\%$.

Al termine di questo periodo, i provini vengono estratti dalle casseforme e lasciati maturare nelle stesse condizioni fino al momento della prova finale, prevista dopo 28 giorni.

Durante il getto è stato realizzato uno strato di malta su un campione di prova con supporto in XPS, delle dimensioni di 15 cm x 15 cm x 4 cm. Lo strato, di spessore totale pari a 5 mm, è stato applicato in due fasi: inizialmente è stato steso uno strato di 2,5 mm, su cui è stata poggiata e leggermente pressata l'armatura, lasciandolo asciugare per 24 ore, quindi, è stato applicato un secondo strato di 2,5 mm, completando così la stratificazione prevista (Figura 34).



Figura 34: Stesura di prova Mapetherm

Il provino è stato rivestito con pellicola e lasciato maturare nella cella di stagionatura, ad una temperatura di 20 ± 1 °C e U.R. = $50 \pm 5\%$, per 28 giorni.

2.4.2 Rasobuild

Il confezionamento della miscela Rasobuild Extra Fine White è stato realizzato aggiungendo a 2000 g di premiscelato il 55% in peso di acqua (1100 g). Anche in questo caso, prima di procedere alla realizzazione dei provini per le prove di resistenza meccanica, la miscela fresca è stata sottoposta alla prova di lavorabilità (Figura 35).



Figura 35: Prova di lavorabilità Rasobuild, media dello spandimento 11,6 cm

Successivamente si è passati al riempimento della cassaforma, di dimensioni 4 cm x 4 cm x 16 cm, che era stata trattata precedentemente con un disarmante (Figura 36).



Figura 36: Disarmante e cassero per prova di resistenza meccanica con Rasobuild

Infine, il provino viene stagionato nella cella di maturazione per 28 giorni, mantenuto a una temperatura di 20 ± 1 °C e con umidità relativa (U.R.) del $50 \pm 5\%$.

2.4.3 CanapaMix3

La miscela CanapaMix3 è stata preparata omogeneizzando 660 g di premiscelato con un'aggiunta del 50% in peso di acqua (330 g). Per valutare il comportamento della miscela, sono state effettuate sia la prova di lavorabilità (Figura 37) che quella di resistenza meccanica.

Lo slump test è stato condotto riempiendo un cono metallico con l'impasto, che successivamente è stato posizionato su un tavolo vibrante. Dopo 15 colpi, è stato misurato lo spandimento del materiale una volta rimosso il cono, così da determinare la sua lavorabilità.



Figura 37: Prova di lavorabilità CanapaMix3, media dello spandimento 13,3 cm

Per le prove di resistenza meccanica, sono stati preparati prismi di dimensioni 4 cm x 4 cm x 16 cm. Il cassero, precedentemente trattato con disarmante, è stato riempito con l'impasto di CanapaMix3 utilizzando una cazzuola e un tavolo vibrante per favorire il costipamento e messi a maturare con le stesse modalità dei campioni precedenti.

È stato inoltre preparato un campione da un pannello di canapa di dimensioni 15 cm x 15 cm x 4 cm. Su questo provino è stato applicato uno strato di malta di 5 mm, suddiviso in due fasi: inizialmente uno strato di 2,5 mm, su cui è stata pressata leggermente l'armatura; dopo un periodo di 24 ore, necessario per l'asciugatura, è stato applicato un secondo strato di 5,5 mm. Anche questo campione è stato rivestito con pellicola e lasciato maturare per 28 giorni nella cella di stagionatura, alle stesse condizioni dei provini per la resistenza meccanica (Figura 38).



Figura 38: Cassero per prova di resistenza meccanica e campione di prova con CanapaMix3

2.4.4 UNIVPM

Il mix design per il confezionamento della miscela di prova UNIVPM (Tabella 13) prevede la specifica combinazione e dosaggio dei componenti:

Tabella 13: Mix design per 1 L di finitura UNIVPM

| COMPONENTI | QUANTITÀ (g) |
|-------------------------------------|--------------|
| Silica 86% SSA | 179g |
| Bottom ash | 206g |
| Fly ash | 179g |
| Calce | 383g |
| Acqua | 542g |
| Cellulosa (Quimialmel-ITALIA S.p.A) | 6,63g |
| Fluidificante (Melment F10) | 0,19g |
| Antiritiro (Metalat) | 4,47g |

Subito dopo la realizzazione, l'impasto è stato sottoposto alla prova di lavorabilità (Figura 39), seguita dal riempimento della cassaforma. Durante questa fase, è stata prestata particolare attenzione all'espulsione dell'aria e al corretto costipamento, come effettuato nelle malte precedenti.



Figura 39: Prova di lavorabilità UNIVPM, media dello spandimento 13 cm

Anche questo provino viene avvolto con pellicola (Figura 40) e lasciato stagionare per 28 giorni nella cella di maturazione, alle stesse condizioni dei campioni precedentemente descritti.



Figura 40: Cassero per prova di resistenza meccanica con finitura UNIVPM

2.5 Getti definitivi delle miscele

Una volta completati i getti di prova, si è proceduto alla realizzazione dei campioni definitivi da sottoporre alle prove di caratterizzazione, come da obiettivo della nostra sperimentazione.

2.5.1 Mapetherm

Realizzati tutti i supporti, sia quelli commerciali (XPS) sia quelli in canapa, si è passati alla preparazione e stesura del primo strato della combinazione di lastra commerciale con finitura commerciale Mapetherm AR1 GG. La preparazione della finitura prevede, secondo la scheda tecnica, di versare sotto agitazione 5298 g di Mapetherm AR1 GG in un recipiente contenente acqua pulita in una quantità pari al 22% in peso (1166 g). L'intera miscela viene quindi agitata con un trapano a frusta (Figura 41) per circa quattro minuti, fino a ottenere un impasto liscio e omogeneo, privo di grumi.



Figura 41: Trapano a frusta

Una volta raggiunta la consistenza desiderata, la miscela è stata sottoposta alla prova di lavorabilità mediante lo slump test, normato ai sensi della UNI EN 12350-2 (Figura 42). Questa prova si articola in quattro fasi principali:

- Riempimento dello stampo tronco conico: si utilizza uno stampo in acciaio di dimensioni 100 mm (base inferiore) x 200 mm (base superiore) x 300 mm (altezza), con un peso di 2 kg.
- Assestamento della miscela: una volta riempito il cono, l'impasto viene compattato tramite 15 colpi.
- Rimozione dello stampo: il cono viene sollevato lentamente in verticale, evitando movimenti laterali per non influenzare il risultato.

- Misurazione dello spandimento: viene quindi misurato lo spandimento della miscela, determinando la sua lavorabilità.



Figura 42: Mapetherm, media dello spandimento 13,3 cm

Prima di tutto, l'impasto è stato inserito all'interno di un cassero, precedentemente ricoperti di disarmante, per eseguire le prove di resistenza meccanica (Figura 43), utilizzando una cazzuola e una staggia per livellare accuratamente la superficie.



Figura 43: Cassero 4 cm x 4 cm x 16 cm per prove di resistenza meccanica Mapetherm

Successivamente, il cassero è stato messo su un tavolo vibrante per favorire il riempimento uniforme e la fuoriuscita dell'aria inglobata. Il campione per la resistenza meccanica così preparato è stato ricoperto con pellicola e lasciato a stagionare nella cella di maturazione per tre giorni in camera climatica alla temperatura di 20 ± 1 °C e con U.R. = $50 \pm 5\%$. Dopo questo breve periodo, il cassero viene rimosso, e il campione prosegue la sua maturazione nella cella per ulteriori 25 giorni.

Completata la preparazione dei campioni per la prova di resistenza meccanica, viene applicato uno strato di 0,25 cm di finitura Mapetherm sui supporti commerciali (XPS) di altezza pari a 4 cm per tutte e cinque le geometrie (Figura 44). In questa fase, è prevista anche l'applicazione dell'armatura

in fibra di vetro, che viene inserita immediatamente dopo la stesura dello strato e fatta penetrare con l'aiuto di un raschietto.

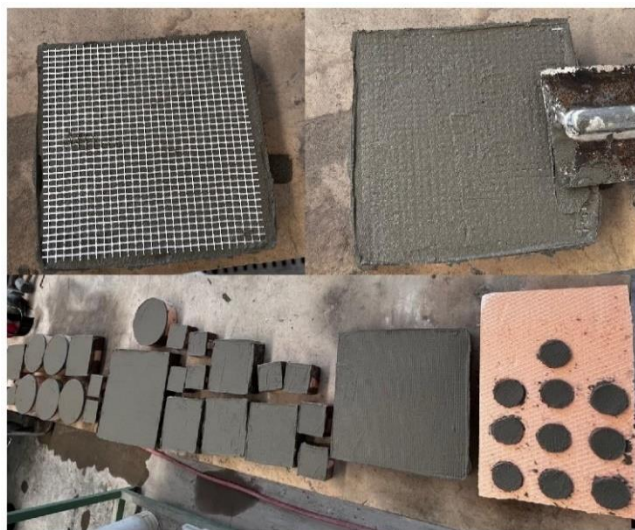


Figura 44: Campioni con supporti XPS e primo strato finitura Mapetherm

Trascorse le 24 ore di stagionatura, si procede con la stesura del secondo strato di 0,25 cm, della finitura commerciale Mapetherm, realizzato utilizzando gli stessi rapporti del giorno precedente. Prima di applicare questo secondo strato la superficie, già indurita, è stata inumidita con acqua per garantire un'adesione ottimale. Successivamente, i provini sono stati ricoperti con una pellicola per evitare l'evaporazione dell'acqua e lasciati maturare per 14 giorni a temperatura ambiente.

2.5.2 Rasobuild

Dopo due settimane dalla stesura del primo strato di finitura Mapetherm sui supporti XPS, è stato applicato il secondo strato di finitura commerciale Rasobuild, suddiviso in due spessori di 0,15 cm ciascuno. Per migliorare l'adesione tra i diversi strati, i campioni sono stati precedentemente inumiditi utilizzando apposite spugnette imbevute d'acqua.

Per preparare la finitura Rasobuild, per il primo strato, sono stati aggiunti 1925 g di acqua (pari al 55% in peso) a 3500 g di premiscelato. Il Rasobuild Eco Extra è stato aggiunto gradualmente al contenitore, amalgamando l'impasto con un trapano a frusta fino ad ottenere una consistenza omogenea e priva di grumi ed una volta ottenuto l'impasto con le caratteristiche richieste è stata eseguita la prova di lavorabilità (Figura 45).



Figura 45: Rasobuild, media dello spandimento 11,4 cm

In un secondo momento, si è proceduto alla realizzazione dei provini per le prove di resistenza meccanica, utilizzando casseri precedentemente trattati con disarmante (Figura 46) e lasciati stagionare per 28 giorni, ricoperti da pellicola, all'interno della cella di maturazione.



Figura 46: Cassero 4 cm x 4 cm x 16 cm per prove di resistenza meccanica Rasobuild

In seguito, si è passati alla stesura del primo strato di Rasobuild di 0,15 cm su tutti i supporti commerciali precedentemente inumiditi, applicando un'elevata pressione per garantire l'adesione ed espellere l'aria presente nelle porosità per poi ricoprirli con pellicola per evitare l'evaporazione dell'acqua. Dopo 24 ore, è stato applicato il secondo strato di ulteriori 0,15 cm, previa umidificazione della superficie. L'impasto è stato realizzato utilizzando 2500 g di premiscelato e il 55% in peso di acqua (1375 g). Anche in questo caso, i provini sono stati avvolti con pellicola e lasciati maturare per due settimane a temperatura ambiente (Figura 47).



Figura 47: Campioni con supporti XPS e strato finitura Rasobuild Eco Extrafino

2.5.3 CanapaMix3

La miscela CanapaMix3 è stata preparata combinando 7050 g di premiscelato con 3505 g di acqua (pari al 50% in peso). Per ottenere un impasto liscio e omogeneo, gli ingredienti sono stati posti in un recipiente e amalgamati per 4-5 minuti con l'ausilio di un trapano a frusta. Successivamente, al fine di determinare la consistenza della miscela fresca, è stata effettuata la prova di lavorabilità mediante lo slump test (Figura 48).



Figura 48: CanapaMix3, media dello spandimento 13,25 cm

Parte dell'impasto confezionato sarà utilizzato per la realizzazione di provini per la prova di resistenza meccanica di dimensioni 4 cm x 4 cm x 16 cm (Figura 49).



Figura 49: Cassero 4 cm x 4 cm x 16 cm per prove di resistenza meccanica CanapaMix3

La seconda parte dell'impasto restante è stata impiegata per stendere un primo strato di 0,25 cm di spessore su supporti in canapa di 4 cm di altezza. La stesura di questo strato, con successiva applicazione dell'armatura, viene fatta su tutte le diverse geometrie previste più un pannello intero delle dimensioni 60 cm x 110 cm da cui valuteremo il grado di fessurazione e su cui verrà applicata anche la finitura UNIVPM. Dopo questo passaggio i provini vengono lasciati stagionare per 24 ore a temperatura ambiente (Figura 50).



Figura 50: Campioni con supporti in canapa e primo strato CanapaMix3

Trascorso il tempo di stagionatura, si procede alla stesura del secondo strato, di 0,55 cm, della finitura in CanapaMix3, preparato con 8000 g di premiscelato e 4000 g di acqua (pari al 50% in peso), dopo aver accuratamente inumidito lo strato sottostante. I provini così preparati vengono poi ricoperti con pellicola per prevenire l'evaporazione dell'acqua e lasciati maturare per 14 giorni a temperatura ambiente (Figura 51).



Figura 51: Campioni con supporti in canapa e secondo strato CanapaMix3

2.5.4 UNIVPM

La finitura UNIVPM, con uno spessore totale di 3 mm, verrà applicata in due strati da 1,5 mm ciascuno, a distanza di 24 ore l'uno dall'altro. Il mix design prevede la preparazione di due miscele distinte (Tabella 14): una miscela priva di biossido di titanio (TiO_2) e una miscela contenente quest'ultimo. Il TiO_2 agisce come catalizzatore fotocatalitico, attivato dalla luce ultravioletta, innescando reazioni di ossidazione e riduzione che degradano i composti organici volatili (VOCs) e gli ossidi di azoto (NO_x). Per questo motivo, il biossido di titanio sarà applicato esclusivamente sui

supporti di dimensioni 7 cm x 7 cm x 4 cm destinati alle prove di adsorbimento e fotocatalisi, nello specifico VOCs e NOx.

Tabella 14: Mix design finitura UNIVPM

| | UNIVPM (4 L) | UNIVPM + TiO ₂ (0,4 L) |
|------------------------------|--------------|-----------------------------------|
| H ₂ O in aggiunta | 4 g | |
| H ₂ O | 2166 g | 217 g |
| Calce | 1535 g | 154 g |
| Silica | 385,17 g | 39 g |
| Silica s.s.a. | 717 g | 72 g |
| Bottom ash | 822 g | 82 g |
| Fly ash | 717 g | 72 g |
| TiO ₂ | | 9 g |
| Antiritiro | 18,96 g | 1,9 g |
| Cellulosa | 26,54 g | 2,65 g |
| Superfluidificante | 0,76 g | 0,08 g |

La preparazione della miscela avviene in diversi passaggi, che richiedono attenzione per garantire la qualità e l'efficacia del prodotto finale. Questi sono:

- **Pesatura degli ingredienti:** ogni componente deve essere pesato con precisione secondo le proporzioni specificate nel mix design. Questa fase è cruciale per mantenere l'integrità della formula.
- **Miscelazione:** iniziare unendo acqua e silice per avere la condizione superficie satura asciutta (s.s.a.) ricavata tramite proporzione. Successivamente, mescolare gli additivi tra loro e infine amalgamare tutti i componenti secchi fino a ottenere una miscela omogenea.
- **Aggiunta di acqua:** aggiungere lentamente l'acqua e miscelare con un trapano a frusta fino a ottenere una miscela omogenea e priva di grumi. Questo passaggio assicura che la miscela abbia la giusta fluidità e consistenza.

Dopo questi passaggi, si verifica la consistenza della miscela valutando la lavorabilità attraverso lo slump test (Figura 52).



Figura 52: UNIVPM, media dello spandimento 12,75 cm

Si lascia riposare la miscela per alcuni minuti per permettere l'eventuale espulsione di bolle d'aria, e in seguito si passa all'applicazione dell'impasto solo su metà dei supporti commerciali e in canapa (Tabella 15).

Tabella 15: Supporti utilizzati per stesura finitura UNIVPM

| Dimensioni (cm) | N° Supporti commerciali (XPS) | N° Supporti in canapa (HEMP) |
|-----------------|-------------------------------|------------------------------|
| 30x30 | 1 | 1 |
| Φ16,8 | 3 | 3 |
| 15x15 | 3 | 3 |
| 7x7 | 6 | 6 |
| Φ5 | 5 | 5 |
| 60x110 | 0 | 1 |

Per i supporti in canapa con substrato in CanapaMix3, prima di stendere la finitura UNIVPM o la pittura, è stato applicato un primer specifico, il Canaprimer, per migliorare l'adesione tra le due malte. La preparazione del Canaprimer richiede la diluizione con acqua in un rapporto di 1:1 e l'applicazione avviene utilizzando rulli da pittura per garantire una distribuzione uniforme.

Dopo l'applicazione del primo strato della finitura UNIVPM, è necessario attendere 24 ore affinché indurisca. Una volta trascorso questo tempo, si procede alla stesura del secondo strato. Per proteggere la superficie durante l'indurimento della finitura UNIVPM e per prevenire l'evaporazione precoce dell'acqua, i provini vengono ricoperti con pellicola per 8 giorni e lasciati maturare a temperatura ambiente per i restanti 20 (Figura 53). Seguendo questi step in modo rigoroso, si garantirà una miscela di alta qualità, pronta per essere utilizzata nelle applicazioni previste.



Figura 53: Supporti in XPS e canapa con finitura UNIVPM

2.6 Fessurazione

La prova di caratterizzazione della fessurazione da ritiro è un metodo utilizzato per analizzare e valutare le fessure che si formano sulla superficie delle malte a causa della contrazione volumetrica durante la fase di indurimento. Questa analisi è essenziale per comprendere le cause delle fessurazioni, le loro caratteristiche e individuare eventuali soluzioni.

Nel caso specifico, è stato testato un campione realizzato con un pannello in Canapa, delle dimensioni 60 cm x 110 cm x 4 cm, su cui è stato applicato il CanapaMix3 (con le stesse modalità dei campioni delle altre prove di caratterizzazione, compreso l'inserimento della fibra di rinforzo) e uno strato di finitura UNIVPM opportunamente ricoperto dopo le fasi del getto. Dopo 7 giorni dalla posa della finitura UNIVPM, sono state osservate le prime fessure, nonostante siano state adottate misure preventive per controllare l'umidità e la temperatura durante l'indurimento quali l'uso di pellicole per ridurre l'evaporazione dell'acqua e l'applicazione della malta in due strati. Tuttavia, dopo 28 giorni di maturazione, sono emerse numerose fessure sulla superficie del campione, alcune lo attraversavano per intero, mentre altre più piccole sono localizzate lungo i bordi (Figura 87).

Per ridurre il rischio di fessurazione nella finitura UNIVPM, si potrebbe considerare l'aggiunta di additivi espansivi, come il CaO, già presente in parte come antiritiro. Un'ulteriore soluzione potrebbe essere l'ottimizzazione del rapporto acqua/cemento per ridurre al minimo l'acqua in eccesso e migliorare la resistenza al ritiro.



Figura 54: Pannello in canapa con finitura UNIVPM fessurato

2.6.1 Stesura pittura

La pittura Keradecor White Plus, utilizzata per metà dei supporti commerciali e in canapa, richiede l'aggiunta di acqua pari al 30% in peso per la diluizione della stessa. Prima dell'applicazione, le superfici devono essere preparate accuratamente: è necessario rimuovere sporco e polvere,

carteggiare le superfici con carta vetrata per renderle lisce e migliorare l'aderenza della pittura. Il numero di provini su cui viene applicata è (Tabella 16):

Tabella 16: Supporti utilizzati per la stesura della pittura

| Dimensioni (cm) | N° Supporti commerciali (XPS) | N° Supporti in canapa (HEMP) |
|-----------------|-------------------------------|------------------------------|
| 30x30 | 1 | 1 |
| Φ16,8 | 3 | 3 |
| 15x15 | 3 | 3 |
| 7x7 | 6 | 6 |
| Φ5 | 5 | 5 |

Keradecor White Plus viene applicata su tutta la superficie con pennello o rullo, in due mani, evitando colature. La superficie deve essere ben asciutta o avere un'umidità non superiore al 6%. È importante rispettare le condizioni ambientali durante l'applicazione: temperatura compresa tra +5 °C e +30 °C e umidità relativa inferiore all'80%. Tra la prima e la seconda mano di pittura è richiesto un tempo di sovrapplicazione di almeno 6 ore a +23 °C e con umidità relativa (U.R.) inferiore o uguale all'80% (Figura 54).

Queste condizioni sono essenziali per ottenere una buona finitura e per evitare problemi come colature o scarsa adesione della pittura.



Figura 55: Stesura pittura Keradecor White Plus

Capitolo 3

CARATTERIZZAZIONE DEI CAMPIONI

3.1 Caratterizzazione meccanica delle malte

3.1.1 Resistenza meccanica a flessione e compressione delle varie malte

La resistenza meccanica di un materiale indica il massimo sforzo che esso può sopportare prima di rompersi. Questa proprietà viene determinata sottoponendo il materiale a sollecitazioni meccaniche attraverso prove specifiche, come la flessione e la compressione. Per rendere i test più semplici e standardizzati, vengono utilizzati campioni prismatici, chiamati provini, delle dimensioni di 4 cm x 4 cm x 16 cm.

La prova di flessione, normata secondo la UNI EN 1015-11:2007, valuta la capacità di un materiale di resistere alla deformazione sotto una forza flessoria. Il test misura:

- La duttilità (capacità di un materiale di deformarsi senza rompersi),
- La resistenza alla flessione (forza massima che può sopportare prima di rompersi),
- La resistenza alla frattura e alla rottura.

Il campione viene collocato su due mandrini di supporto per garantire un corretto allineamento. Successivamente, una forza di compressione viene applicata gradualmente al centro del provino (nella mezzeria), e la deformazione che ne deriva viene monitorata tramite un estensimetro (Figura 55). Questo strumento permette di ottenere la curva sforzo-deformazione a flessione. Durante la prova, si generano forze di compressione nella parte superiore del provino e forze di trazione nella parte inferiore. La resistenza del materiale è maggiore in compressione rispetto alla trazione (circa dieci volte maggiore). Quindi, il campione tenderà a rompersi a causa della sua minore resistenza alla trazione.



Figura 56: Provini 4 cm x 4 cm x 16 cm sottoposti alla prova a flessione

Il valore della resistenza a flessione del singolo provino si calcola con la seguente formula:

$$R_f = 3 F l / (2 b h^2)$$

Dove:

- R_f è la resistenza a flessione in MPa.
- F è il valore del carico massimo applicato in N.
- l indica la distanza tra gli assi dei supporti, pari a 100 mm nel caso specifico.
- b è il lato della sezione quadrata del provino in mm, nel nostro caso 40 mm.
- h indica l'altezza del provino che nel nostro caso è uguale a b .

Di seguito vengono riportati i dati relativi alle prove di flessione (Tabella 17) per i campioni realizzati con le miscele di prova, mentre per i campioni reali la prova non è stata eseguita poiché non rilevante al fine del nostro studio.

Tabella 17: Risultati prove a flessione sui campioni di prova

| Materiale | Forza Massima Ff, max [kN] | Tensione Massima σ_f , max [MPa] | Tensione media max σ_f , media max [MPa] | Deviazione Standard Dev. St. [MPa] |
|-------------|----------------------------------|---|---|--|
| Mapetherm 1 | 1,42 | 3,30 | 4,11 | 1,38 |
| Mapetherm 2 | 1,41 | 3,30 | | |
| Mapetherm 3 | 2,43 | 5,70 | | |
| Rasobuild 1 | 0,81 | 1,90 | 1,69 | 0,23 |
| Rasobuild 2 | 0,61 | 1,43 | | |
| Rasobuild 3 | 0,74 | 1,73 | | |
| CanapaMix 1 | 0,069 | 0,16 | 0,15 | 0,022 |
| CanapaMix 2 | 0,055 | 0,13 | | |
| CanapaMix 3 | / | / | | |
| UNIVPM 1 | 0,21 | 0,49 | 0,70 | 0,25 |
| UNIVPM 2 | 0,42 | 0,98 | | |
| UNIVPM 3 | 0,27 | 0,63 | | |

La prova di compressione è fondamentale per valutare la resistenza di un materiale ai carichi di schiacciamento. In questa prova, metà del campione, già rotto nella precedente prova di flessione, viene posizionato tra due piatti paralleli di una macchina per test meccanici. Su di esso viene

applicata una forza unidirezionale e gradualmente aumentata lungo l'asse di compressione. Lo scopo è osservare il comportamento del materiale fino al punto di rottura o fino a quando non si verifica una deformazione permanente (Figura 56).

Durante questo test, si possono raccogliere dati relativi a:

- Limite elastico: il punto oltre il quale il materiale inizia a deformarsi in modo permanente.
- Punto di snervamento: il limite oltre il quale il materiale non ritorna alla sua forma originale.
- Resistenza alla compressione: il valore massimo di sforzo che il materiale può sopportare prima di fratturarsi o subire una deformazione irreversibile.

Questi dati (Tabella 18) sono essenziali per caratterizzare le proprietà meccaniche del materiale, soprattutto per applicazioni in cui esso sarà soggetto a carichi di compressione, come nell'ingegneria civile, per la progettazione di strutture e materiali edili.



Figura 57: Provini 4 cm x 4 cm x 8 cm sottoposti alla prova a compressione

La resistenza a compressione è stata determinata secondo la formula:

$$R_c = F/A$$

Dove:

- R_c è la resistenza di compressione in MPa.
- F è la forza di compressione in N.
- A è la superficie di applicazione della forza F in mm^2 , in questo caso pari a 1600 mm^2 .

Tabella 18: Risultati prove a compressione sui campioni di prova

| Materiale | Forza Massima Fc, max [kN] | | Tensione Massima σ_c , max [MPa] | Tensione media max $\bar{\sigma}_c$, media max [MPa] | Deviazione Standard Dev. St. [MPa] |
|-------------|----------------------------------|-------|---|---|--|
| Mapetherm 1 | 1A | 20,02 | 12,51 | 12 | 0,87 |
| | 1B | 20,73 | 12,96 | | |
| Mapetherm 2 | 2A | 17,44 | 10,90 | | |
| | 2B | 17,45 | 10,91 | | |
| Mapetherm 3 | 3A | 19,86 | 12,41 | | |
| | 3B | 19,70 | 12,31 | | |
| Rasobuild 1 | 1A | 7,81 | 4,88 | 4,84 | 0,16 |
| | 1B | 8,05 | 5,03 | | |
| Rasobuild 2 | 2A | 7,65 | 4,78 | | |
| | 2B | 7,27 | 4,54 | | |
| Rasobuild 3 | 3A | 7,92 | 4,95 | | |
| | 3B | 7,73 | 4,83 | | |
| CanapaMix 1 | 1A | / | / | 3,99 | 0,08 |
| | 1B | / | / | | |
| CanapaMix 2 | 2A | 6,5 | 4,06 | | |
| | 2B | 6,48 | 4,05 | | |
| CanapaMix 3 | 3A | 6,28 | 3,93 | | |
| | 3B | 6,25 | 3,91 | | |
| UNIVPM 1 | 1A | 5,18 | 3,24 | 3,07 | 0,27 |
| | 1B | 5,10 | 3,19 | | |
| UNIVPM 2 | 2A | 5,16 | 3,23 | | |
| | 2B | 4,80 | 3,00 | | |
| UNIVPM 3 | 3A | 4,06 | 2,54 | | |
| | 3B | 5,18 | 3,24 | | |

Di seguito vengono riportati i risultati delle prove effettuate sui provini delle malte utilizzate per confezionare i campioni con i supporti in XPS e canapa (Tabella 19).

Tabella 19: Risultati prove a compressione sui campioni reali

| Materiale | Forza Massima Fc, max [kN] | | Tensione Massima σ_c , max [MPa] | Tensione media max $\bar{\sigma}_c$, media max [MPa] | Deviazione Standard Dev. St. [MPa] |
|-------------|----------------------------------|-------|---|---|--|
| Mapetherm 1 | 1A | 12,97 | 8,11 | 7,10 | 0,75 |
| | 1B | 12,92 | 8,08 | | |
| Mapetherm 2 | 2A | 10,73 | 6,71 | | |
| | 2B | 10,52 | 6,58 | | |
| Mapetherm 3 | 3A | 10,51 | 6,57 | | |
| | 3B | 10,67 | 6,67 | | |
| Rasobuild 1 | 1A | 3,58 | 2,24 | 2,30 | 0,08 |
| | 1B | 3,44 | 2,15 | | |
| Rasobuild 2 | 2A | 3,64 | 2,28 | | |
| | 2B | 3,82 | 2,39 | | |
| Rasobuild 3 | 3A | 3,61 | 2,26 | | |
| | 3B | 3,64 | 2,28 | | |
| CanapaMix 1 | 1A | 0,28 | 0,18 | 0,20 | 0,01 |
| | 1B | 0,32 | 0,20 | | |
| CanapaMix 2 | 2A | 0,33 | 0,21 | | |
| | 2B | 0,37 | 0,23 | | |
| CanapaMix 3 | 3A | 0,33 | 0,21 | | |
| | 3B | 0,30 | 0,19 | | |
| UNIVPM 1 | 1A | 5,57 | 3,48 | 3,40 | 0,10 |
| | 1B | 5,36 | 3,35 | | |
| UNIVPM 2 | 2A | 5,42 | 3,39 | | |
| | 2B | 5,72 | 3,58 | | |
| UNIVPM 3 | 3A | 5,31 | 3,32 | | |
| | 3B | 5,28 | 3,30 | | |

3.1.2 Pundit

Un'ulteriore prova a cui sono stati sottoposti i provini delle malte, di dimensioni 4 cm x 4 cm x 16 cm, dopo il periodo di maturazione di 28 giorni, è quella di indagine ultrasonica per la determinazione del modulo elastico dinamico tramite uno strumento chiamato Pundit.

Il Pundit (Figura 57) è uno strumento che utilizza due sonde, una trasmittente e una ricevente, per misurare il tempo impiegato da un'onda ultrasonica ad attraversare un materiale. La velocità di propagazione delle onde ultrasoniche attraverso il campione è strettamente correlata al modulo elastico del materiale. Le onde si propagano facilmente in materiali densi e compatti, mentre incontrano più difficoltà in quelli con porosità, macrovuoti o difetti.



Figura 58: Pundit

La procedura consiste nel misurare il tempo di transito dell'onda ultrasonica e, conoscendo lo spessore del campione, calcolare la velocità di propagazione. A partire da questa velocità V e considerando la densità ρ del materiale e il coefficiente di Poisson ν (che per malte e calcestruzzo è pari a 0,3), è possibile calcolare il modulo elastico dinamico (E_d), che fornisce informazioni sulla rigidità del materiale, utilizzando la formula appropriata.²⁵

$$E_d = \rho \cdot v^2 \cdot \frac{[(1 + \nu_d) + (1 - 2\nu_d)]}{1 - \nu_d}$$

La prova è così articolata:

- Prima della misurazione, è applicato uno strato di vasellina tra i trasduttori e il campione per garantire un buon contatto, riducendo l'influenza della scabrosità superficiale e migliorando la trasmissione delle onde ultrasoniche. Lo strumento viene tarato utilizzando un cilindro di riferimento con un tempo di attraversamento di 25,3 μ s, il che permette una calibrazione precisa (Figura 58).

²⁵ Collepari, Collepari, Troli, *Il nuovo calcestruzzo*, Ponzano Veneto, Tintoretto, 2009 (quinta edizione)

- La sonda trasmittente emette un impulso ultrasonico che attraversa il campione e la sonda ricevente, posizionata sulla faccia opposta del campione, rileva l'onda ultrasonica che lo attraversa.
- Si misura il tempo di transito t , cioè il tempo impiegato dall'onda per attraversare il campione da cui ricavare la velocità delle onde ultrasoniche V nel campione è determinata dalla formula:

$$V=Lt$$

Dove:

- L è la lunghezza del campione, cioè la distanza tra la sonda trasmittente e quella ricevente (in questo caso 16 cm).
- t è il tempo di transito misurato dalle onde ultrasoniche.
- Una volta calcolato V , si può ottenere il modulo elastico dinamico E_d , che rappresenta una misura della rigidità del materiale sotto sollecitazioni dinamiche.

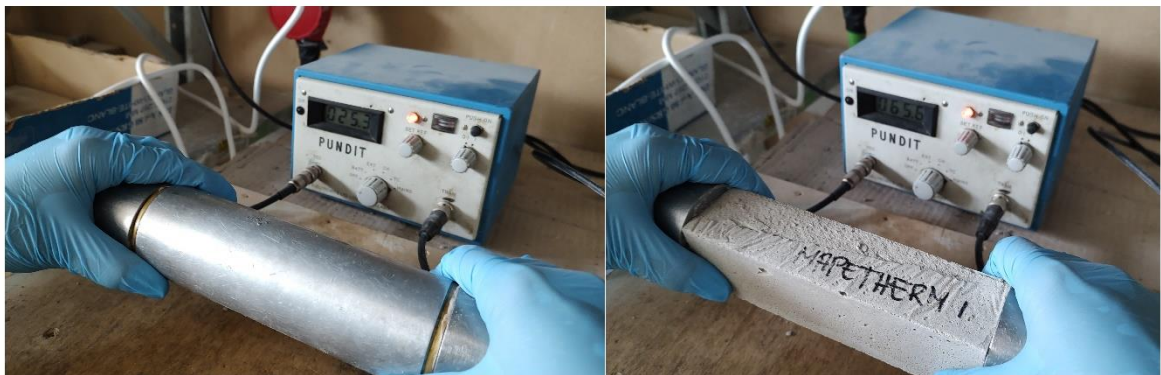


Figura 59: Calibrazione dello strumento e misurazione E_d

Questa prova fornisce informazioni fondamentali per valutare la qualità del materiale e le sue prestazioni meccaniche senza distruggere il campione.

La prova ultrasonica è ampiamente utilizzata nel campo dell'ingegneria civile e delle costruzioni per monitorare la qualità e le proprietà meccaniche di materiali come calcestruzzo, malte e pietre naturali.



Figura 60: Malte di prova 4 cm x 4 cm x 16 cm

Da questa prova abbiamo ottenuto risultati sia per i provini delle malte di prova (Figura 59 – Tabella 20) sia per le malte reali utilizzate per la realizzazione dei campioni da caratterizzare (Figura 60 – Tabella 21).

Tabella 20: Dati dei provini 4 cm x 4 cm x 16 cm delle miscele di prova sottoposti a Pundit

| Materiale | Peso P [g] | Massa Volumica ρ [kg/m ³] | Tempo di percorrenza t [μs] | Velocità V [m/s] | Modulo Dinamico Ed [GPa] | Mod.Dinam. Med. Edm [GPa] | Deviazione standard Dev. st |
|----------------|------------------|---|--------------------------------------|------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|
| Mapetherm 1 | 420,27 | 1641,68 | 58,80 | 2721,09 | 11,03 | 10,87 | 0,18 |
| Mapetherm 2 | 424,72 | 1659,06 | 59,40 | 2693,6 | 10,92 | | |
| Mapetherm 3 | 417,37 | 1630,35 | 59,60 | 2684,56 | 10,66 | | |
| Rasobuild 1 | 314,44 | 1228,28 | 98,10 | 1630,99 | 2,96 | 2,97 | 0,05 |
| Rasobuild 2 | 319,69 | 1248,79 | 97,8 | 1635,99 | 3,03 | | |
| Rasobuild 3 | 314,40 | 1228,13 | 98,60 | 1622,72 | 2,93 | | |
| CanapaMix 1 | / | / | / | / | / | / | / |
| CanapaMix 2 | / | / | / | / | / | | |
| CanapaMix 3 | / | / | / | / | / | | |
| UNIVPM 1 | 287,54 | 1123,20 | 86 | 1860,47 | 3,53 | 3,63 | 0,37 |
| UNIVPM 2 | 316,16 | 1235 | 84,10 | 1902,50 | 4,05 | | |
| UNIVPM 3 | 288,46 | 1126,80 | 88,70 | 1803,83 | 3,33 | | |

Per i campioni di prova in canapa non è stata eseguita la prova perché i provini non avevano superfici lisce. Questo è dovuto alla bassa resistenza meccanica del materiale che si è fessurato e frantumato durante le operazioni di scasseratura.

Tabella 21: Dati dei provini 4 cm x 4 cm x 16 cm delle miscele reali sottoposti a Pundit

| Materiale | Peso P [g] | Massa Volumica ρ [kg/m ³] | Tempo di percorrenza t [μs] | Velocità V [m/s] | Modulo Dinamico Ed [GPa] | Mod.Dinam. Med. Edm [GPa] | Deviazione standard Dev. st |
|----------------|------------------|---|--------------------------------------|------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|
| Mapetherm 1 | 355,80 | 1389,84 | 65,60 | 2439,02 | 7,50 | 6,60 | 0,70 |
| Mapetherm 2 | 343,45 | 1341,6 | 70,70 | 2263,08 | 6,23 | | |
| Mapetherm 3 | 342,37 | 1337,38 | 71 | 2253,52 | 6,16 | | |
| Rasobuild 1 | 415,79 | 1624,17 | 92,70 | 1726 | 4,38 | 4,30 | 0,09 |
| Rasobuild 2 | 409,22 | 1598,50 | 93,30 | 1714,90 | 4,25 | | |
| Rasobuild 3 | 422,12 | 1648,90 | 93,20 | 1716,74 | 4,40 | | |
| CanapaMix 1 | 349,90 | 1366,80 | 437,30 | 365,88 | 0,17 | 0,10 | 0,06 |
| CanapaMix 2 | 348,22 | 1360,23 | 561,80 | 284,80 | 0,10 | | |
| CanapaMix 3 | 342,25 | 1336,91 | 435,40 | 367,48 | 0,16 | | |
| UNIVPM 1 | 357,47 | 1396,36 | 76 | 210,10 | 5,60 | 5,60 | 0 |
| UNIVPM 2 | 360,18 | 1406,95 | 76,20 | 209,90 | 5,62 | | |
| UNIVPM 3 | 355,09 | 1387,07 | 76 | 210,1 | 5,58 | | |



Figura 61: Malte reali 4 cm x 4 cm x 16 cm

Dai risultati ottenuti si può osservare che i valori del modulo elastico dinamico (E_d) seguono una tendenza simile a quella della resistenza meccanica a compressione (R_c). Ad esempio, la finitura Mapetherm presenta sia il valore più alto di resistenza a compressione, sia il modulo elastico più elevato, indicando una maggiore rigidità e compattezza del materiale. Al contrario, la finitura CanapaMix3 mostra i valori più bassi sia per R_c che per E_d , suggerendo una minore resistenza meccanica e una struttura più porosa o meno densa.

3.2 Pull-off/ Aderenza

La prova di Pull-off, descritta nella norma UNI EN 1015-12:2002, è un metodo standardizzato per misurare l'aderenza delle malte da muratura e intonaci su vari supporti. Questa prova consiste nel determinare la resistenza all'estrazione della malta applicata, fornendo un'indicazione della qualità del legame tra la malta e il substrato (Figura 61). I risultati, così ottenuti, forniscono una stima dell'aderenza tra i materiali, utile per valutare l'efficacia del sistema di rivestimento o consolidamento utilizzato.

Nel caso dei 20 campioni esaminati, con un diametro (ϕ) di 5 cm (Figura 62), sono stati testati i seguenti materiali e combinazioni:

- 5 campioni in XPS + Pittura Keradecor White Plus.
- 5 campioni in XPS + UNIVPM.
- 5 campioni in Canapa, o anche HEMP, + Pittura Keradecor White Plus.
- 5 campioni in Canapa, o anche HEMP, + UNIVPM.

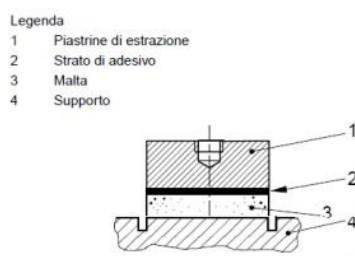


Figura 62: Schema di realizzazione della prova



Figura 63: Campioni di ϕ 5 cm su supporto in canapa (a sinistra) e su supporto in XPS (a destra)

Prima dell'applicazione delle finiture, i pannelli sono stati preparati con un intaglio di circa 0,5 cm di profondità. Dopo la stagionatura degli strati di finitura, la prova di Pull-off prevede l'incollaggio di piastrine metalliche dello stesso diametro dei campioni, utilizzando una resina bicomponente (Figura 63). È importante evitare che la resina debordi, per non compromettere l'esecuzione della

prova o i risultati. La resina viene applicata sulla superficie dei campioni, che devono essere asciutti e puliti dalle parti incoerenti, utilizzando una spatola (Figure 64 e 65). Una volta incollate le piastrine, si attende l'indurimento della resina per tre giorni a 30 °C, come indicato nella scheda tecnica.



Figura 64: Piastre metalliche e resine CARBO-STRUCTURA A e B



Figura 65: Applicazione della resina sulla piastra e sui campioni con supporto XPS



Figura 66: Applicazione della resina sulla piastra e sui campioni con supporto in canapa

Dopo l'indurimento, l'apparecchiatura di prova viene collegata al disco di trazione. La forza viene applicata perpendicolarmente alla superficie del campione, a una velocità tra 0,003 N/(mm²·s) e 0,100 N/(mm²·s), in modo che il distacco avvenga entro un intervallo di tempo compreso tra 20 e

60 secondi, in base alla forza di adesione attesa. L'apparecchio, un dinamometro dotato di una cella di carico e un display digitale ad alta risoluzione, misura la forza al momento del distacco della finitura dal substrato.

Durante la prova, lo strumento (Figura 66) deve essere posizionato parallelo alla superficie del campione, e la testa sferica della vite deve essere alloggiata correttamente nella sua sede. Per garantire che vi sia uno spazio di almeno 10 mm tra la cella di carico e il corpo dell'apparecchiatura, sono state utilizzate aste di legno come rialzi (Figura 67).

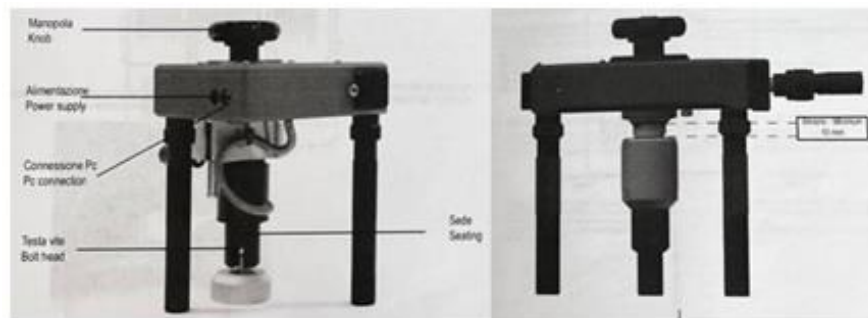


Figura 67: Strumento utilizzato per la prova di Pull-off



Figura 68: Posizionamento dello strumento sui campioni

La resistenza a trazione è calcolata dividendo la forza di trazione massima per l'area del disco di trazione espressa in MPa.

$$f_u = F_u / A$$

Dove:

- f_u è la resistenza a trazione (N/mm²).
- F_u è la forza di trazione (N).
- A è l'area del disco di trazione (mm²).

Durante la prova, la forza di trazione viene applicata in modo graduale e uniforme, senza strappi, e si registra la forza di distacco.

È necessario scartare tutte le prove in cui il distacco avviene a causa di una frattura dello strato adesivo tra la piastrina metallica e la malta, poiché tali risultati non sono rappresentativi dell'adesione reale.

Le modalità di frattura che portano a risultati validi sono illustrate nelle Figure 68, 69 e 70. Se la frattura si verifica come mostrato nelle Figure 69 e 70, cioè quando non si verifica cedimento all'interfaccia tra malta e supporto, i risultati devono essere considerati come valori limite inferiori. Questi valori, sebbene più bassi, devono comunque essere inclusi nel calcolo del valore medio della forza di adesione complessiva.²⁶

Tipo di frattura a - Frattura di adesione - Frattura all'interfaccia tra la malta ed il supporto. Il valore di prova è uguale alla forza di adesione

Legenda

- 1 Piastrine di estrazione
- 2 Strato di adesivo
- 3 Malta
- 4 Supporto

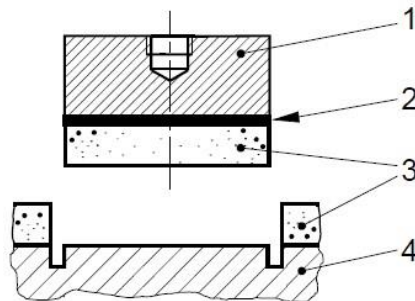


Figura 69: Modalità di frattura – Frattura di adesione

Tipo di frattura b - Frattura di coesione - Frattura all'interno della malta stessa. La forza di adesione è maggiore del valore di prova

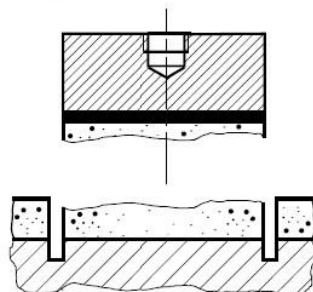


Figura 70: Modalità di frattura – Frattura di coesione Tipo I

²⁶ Normativa UNI EN 1015-12 2002

Tipo di frattura c - Frattura di coesione - Frattura del supporto. La forza di adesione è maggiore del valore di prova

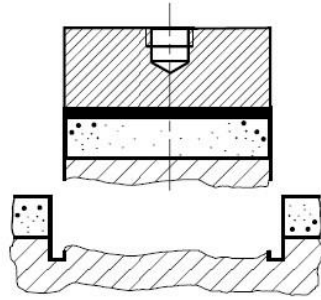


Figura 71: Modalità di frattura – Frattura di adesione Tipo 2

I dati raccolti durante la prova sono i seguenti (Tabella 22):

Tabella 22: Risultati prova di aderenza

| Materiale | Forza di trazione F_u [N] | Area di applicazione A [mm ²] | Resistenza a trazione f_u [MPa] | Velocità f_u, m [MPa] | Deviazione standard Dev. st | Tipologia di rottura |
|------------------|-----------------------------------|---|---|-------------------------------|--------------------------------|----------------------|
| XPS + PITTURA 1 | 341 | 1963 | 0,17 | 0,14 | 0,04 | A |
| XPS + PITTURA 2 | 317 | 1963 | 0,16 | | | A |
| XPS + PITTURA 3 | 164 | 1963 | 0,08 | | | B |
| XPS + PITTURA 4 | 268 | 1963 | 0,13 | | | A |
| XPS + PITTURA 5 | 325 | 1963 | 0,16 | | | A |
| XPS + UNIVPM 1 | 155 | 1963 | 0,08 | 0,14 | 0,06 | B |
| XPS + UNIVPM 2 | / | 1963 | / | | | B |
| XPS + UNIVPM 3 | / | 1963 | / | | | A |
| XPS + UNIVPM 4 | 356 | 1963 | 0,18 | | | A |
| XPS + UNIVPM 5 | 343 | 1963 | 0,17 | | | A |
| HEMP + PITTURA 1 | 36 | 1963 | 0,01 | 0,008 | 0,004 | A |
| HEMP + PITTURA 2 | 17 | 1963 | 0 | | | A |
| HEMP + PITTURA 3 | 21 | 1963 | 0,01 | | | A |
| HEMP + PITTURA 4 | 38 | 1963 | 0,01 | | | A |
| HEMP + PITTURA 5 | 23 | 1963 | 0,01 | | | A |
| HEMP + UNIVPM 1 | 23 | 1963 | 0,01 | 0,008 | 0,004 | A |
| HEMP + UNIVPM 2 | 31 | 1963 | 0,01 | | | A |
| HEMP + UNIVPM 3 | 29 | 1963 | 0,01 | | | A |
| HEMP + UNIVPM 4 | 22 | 1963 | 0,01 | | | A |
| HEMP + UNIVPM 5 | 16 | 1963 | 0 | | | A |

Per i campioni XPS + UNIVPM 2 e XPS + UNIVPM 3 la forza di trazione non è stata rilevata.

Le due modalità di frattura riscontrate sono:

- Frattura all'interfaccia tra malta e supporto.
- Frattura all'interno della malta stessa (in questo caso la frattura si è verificata all'interno della finitura Rasobuild).

Dai valori di resistenza a trazione (f_u), si può notare la qualità, e di conseguenza la miglior prestazione, all'adesione della finitura UNIVPM al substrato, non essendosi staccata all'interfaccia con la finitura Rasobuild o CanapaMix3 (Figure 71 e 72).



Figura 72: Risultati prova di aderenza su campioni XPS + PITTURA(v) e XPS + UNIVPM



Figura 73: Risultati prova di aderenza su campioni HEMP + PITTURA(v) e HEMP + UNIVPM

3.3 Conducibilità termica

La prova di caratterizzazione relativa alla conducibilità termica è fondamentale per determinare la capacità di un materiale di condurre il calore. La normativa di riferimento è la DIN EN 12667, la quale determina la conduttività termica di materiali isolanti utilizzati nell'edilizia e nelle applicazioni industriali. Questa norma definisce i metodi di prova per misurare la conducibilità termica utilizzando il metodo del flusso termico (Heat Flow Meter).

Il principio di base che sfrutta la macchina HFM è quello di misurare il flusso di calore attraverso un campione posto tra due piastre a temperature diverse.

I campioni di materiali da testare sono:

- 1 campione CANAPA + UNIVPM di dimensioni 30 cm x 30 cm x 5,1 cm.
- 1 campione CANAPA + PAINT Keradecor White Plus di dimensioni 30 cm x 30 cm x 4,8 cm.
- 1 campione XPS + UNIVPM di dimensioni 30 cm x 30 cm x 5,1 cm.
- 1 campione XPS + PAINT Keradecor White Plus di dimensioni 30 cm x 30 cm x 4,8 cm.

Le piastre termiche vengono riscaldate e raffreddate per creare una differenza di temperatura controllata attraverso il campione. Esse sono responsabili di mantenere le temperature desiderate su entrambi i lati, avendone una riscaldata mentre l'altra raffreddata. Integrati alle piastre si trovano dei sensori di flusso di calore che misurano la quantità di calore che attraversa il campione dal lato caldo a quello freddo (Figura 73).

La macchina registra queste misurazioni e le utilizza per calcolare la conducibilità termica del campione λ e la resistenza termica R , tramite il flusso di calore medio Q/A , lo spessore del campione L e il gradiente di temperatura ΔT , in accordo con la legge di Fourier.

$$\lambda = \frac{\dot{Q}}{A} \frac{L}{\Delta T} \quad R = \frac{L}{\lambda}$$

Dove:

- λ è la conducibilità termica [W/(m·K)].
- Q/A è il flusso termico [W/m²].
- L è lo spessore del provino [m].
- ΔT è la differenza di temperatura tra la piastra calda e la piastra fredda.
- R è la resistenza termica [m²·K/W].

La trasmittanza termica, nota anche come valore U, è il reciproco della resistenza termica totale (1/R) e più questo valore è basso, migliore è la capacità isolante del materiale.

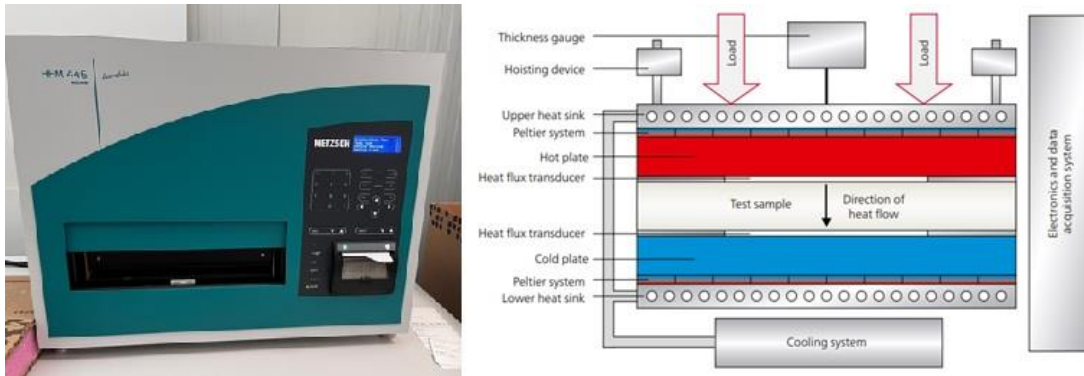


Figura 74: Macchina per la prova di conducibilità termica e schema di funzionamento

Procedura di Misurazione:

- Inserimento del Campione: il campione viene posizionato tra le piastre termiche.
- Stabilizzazione della Temperatura: le piastre termiche sono portate alle temperature desiderate e il sistema viene lasciato stabilizzarsi per assicurarsi che le temperature siano costanti.
- Raccolta dei Dati: stabilizzata la temperatura, i sensori di flusso di calore iniziano a registrare il flusso di calore attraverso il campione (Grafici 3 e 4).
- Calcolo della Conducibilità Termica: considerando i dati raccolti, tramite formule specifiche che tengono conto della differenza di temperatura, lo spessore e l'area della sezione trasversale viene calcolata λ , R e U (Tabella 23).²⁷

Tabella 23: Valori conducibilità termica

| Campioni | Spessore L [mm] | Densità ρ [kg/m ³] | Temperatura T [°C] | Conducibilità termica λ [W/(m·K)] | Resistenza termica R [(m ² ·K/W)] | Trasmittanza Termica U [W/(m ² ·K)] |
|--------------------|-----------------------|---|--------------------------|--|---|---|
| CANAPA + UNIVPM | 51 | 340 | 10 | 0,05 | 1 | 1 |
| CANAPA + PAINT | 48 | 274,90 | 10 | 0,05 | 1,03 | 0,97 |
| XPS + UNIVPM | 51 | 377,40 | 10 | 0,04 | 1,23 | 0,81 |
| XPS + PAINT | 48 | 343,20 | 10 | 0,04 | 1,17 | 0,85 |

²⁷ <https://analyzing-testing.netzsch.com/en/products/thermal-conductivity/hfm-446-lambda-eco-line-1>

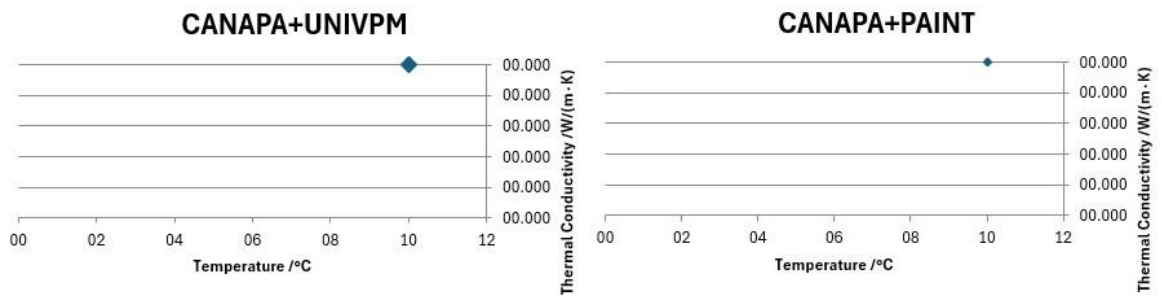


Grafico 3: Thermal Conductivity / W(m·K) campione CANAPA+UNIVPM (sinistra) CANAPA+PAINT (destra)

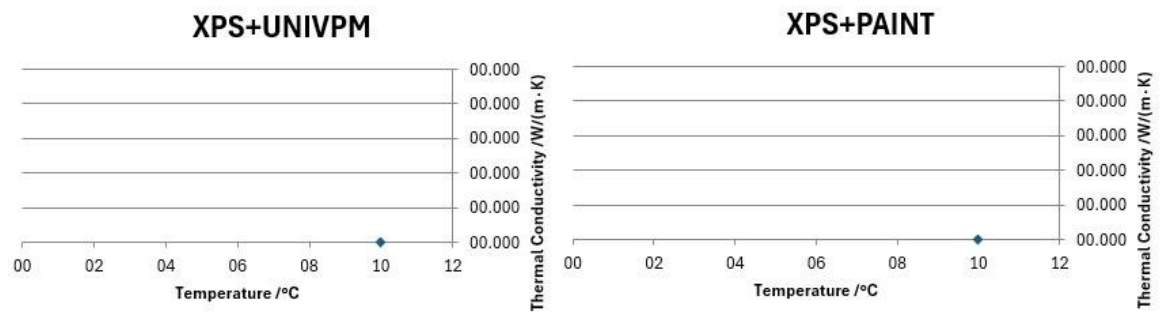


Grafico 4: Thermal Conductivity / W(m·K) campione XPS+UNIVPM (sinistra) XPS+PAINT (destra)

3.4 Adsorbimento VOCs (Volatile Organic Compounds/ Composti Organici Volatili)

I Composti Organici Volatili (COV), o Volatile Organic Compounds (VOCs), sono una categoria di composti chimici caratterizzati da una elevata volatilità, cioè dalla capacità di passare allo stato aeriforme in determinate condizioni di temperatura e umidità. Questi composti, presenti in vari prodotti di uso quotidiano, come cosmetici, detersivi, vernici, pitture e rivestimenti, possono rappresentare un rischio per la salute umana, soprattutto quando l'inalazione avviene in ambienti con scarsa circolazione dell'aria.

Negli ultimi anni, l'efficienza energetica ha portato alla costruzione di edifici con involucri più sigillati per ridurre le perdite di calore, migliorando la stabilità termica interna. Tuttavia, ciò può compromettere la qualità dell'aria interna (IAQ), con conseguente accumulo di inquinanti, la crescita microbica, la concentrazione di CO₂, specie di NO_x e composti organici volatili (VOCs) tra cui metanolo (CH₃OH), formaldeide (CH₂O), benzene (C₆H₆), diclorometano (CH₂Cl₂), etilenglicole (C₂H₆O₂), tetracloroetilene (C₂Cl₄), xilene (C₈H₁₀) e toluene (C₇H₈).

Per la rimozione di questi composti, uno dei metodi più diffusi è l'adsorbimento, che consiste nel trattenere i VOCs su una superficie solida. La prova eseguita utilizza la Gascromatografia (GC – Tabella 24) per monitorare nel tempo la capacità di adsorbimento di ciascun campione, in un sistema chiuso. Come modello di inquinante atmosferico, è stato scelto il Metil Etil Chetone (MEK), grazie alla sua bassa tossicità, per simulare il comportamento dei VOCs nell'ambiente e valutarne l'efficacia di rimozione.²⁸

Tabella 24: Caratteristiche strumenti di prova

| | | |
|---------------------|-------|-------|
| MEK molar mass | 72 | g/mol |
| MEK density | 0,80 | g/mol |
| MEK volume | 1 | ul |
| Box volume | 17 | l |
| Standard gas volume | 24,40 | l |
| Concentration | 47 | Mg/l |
| | 16 | ppm |
| Mass | 1 | g |

²⁸ Qaisar Maqbool, Natalia Czerwinska, Chiara Giosue, Simona Sabbatini, Maria Letizia Ruello, e Francesca Tittarelli. "New waste-derived TiO₂ nanoparticles as a potential photocatalytic additive for lime based indoor finishings." *Journal of Cleaner Production* 373 (2022): 133853. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133853>.

L'apparato di test per la valutazione dell'adsorbimento dei Composti Organici Volatili (VOCs) è costituito da una scatola ermetica in vetro di volume pari a 17 litri, dotata di un ventilatore interno per garantire una continua e uniforme distribuzione dell'aria. All'interno della scatola è installato un sensore PID (Photoionization Detector), che misura la concentrazione dell'inquinante volatile presente nell'aria (Figura 74).

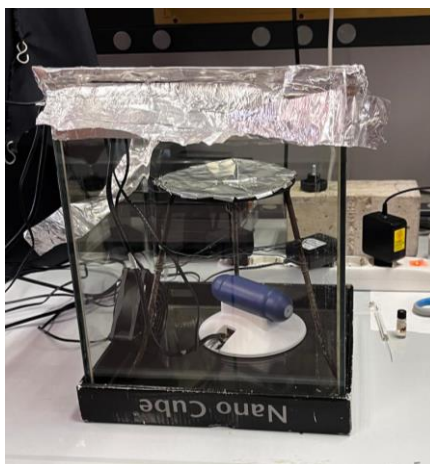


Figura 75: Box prove VOCs con ventola e sensore PID

I campioni da testare, suddivisi in sei gruppi distinti, includono:

- 3 campioni HEMP + PAINT Keradecor White Plus di dimensioni 7 cm x 7 cm x 4,8 cm (giugno 24).
- 3 campioni HEMP + PAINT Iris Color di dimensioni 7 cm x 7 cm x 4,8 cm.
- 3 campioni HEMP + UNIVPM di dimensioni 7 cm x 7 cm x 5,1 cm (giugno 24).
- 3 campioni XPS + PAINT Keradecor White Plus di dimensioni 7 cm x 7 cm x 4,8 cm (giugno 24).
- 3 campioni XPS + PAINT Iris Color di dimensioni 7 cm x 7 cm x 4,8 cm.
- 3 campioni XPS + UNIVPM di dimensioni 7 cm x 7 cm x 5,1 cm (giugno 24).
- 1 campione HEMP+UNIVPM (2) abraso di dimensioni 7 cm x 7 cm x 5,1 cm.
- 1 campione XPS+UNIVPM (2) abraso di dimensioni 7 cm x 7 cm x 5,1 cm.
- 1 campione XPS+UNIVPM (2) non abraso di dimensioni 7 cm x 7 cm x 5,1 cm.
- 1 campione da precedente sperimentazione (MAMMUT) D+UNI T1 (4).

Prima dell'inizio della prova, i campioni sono stati essiccati in stufa per 24 ore a una temperatura di 50 °C (Figura 75), al fine di eliminare l'umidità residua e garantire la stabilità durante il test.



Figura 76: Campioni in stufa a 50 °C

Estratti dalla stufa i campioni sono stati schermati applicando uno strato di scotch metallico sulle parti laterali e sulla base inferiore, per evitare che l'umidità influisse sui risultati del test. Per prevenire ulteriormente che i campioni riassorbissero umidità, sono stati collocati anche all'interno di un essiccatore (Figura 76).



Figura 77: Campioni schermati e in essiccatore (sullo sfondo)

I campioni, così preparati, sono stati posizionati, uno per volta, sul supporto all'interno del box di prova, opportunamente sigillato, pronti per la misurazione dell'adsorbimento dei VOCs.

La prova consiste nel prelevare un microlitro (μL) di MEK, con apposita microsiringa, ed iniettarlo attraverso un setto in silicone forabile posto sulla sommità della scatola, che funge da isolante per mantenere l'ambiente interno sigillato (Figura 77). La durata del test è di un'ora, durante la quale viene monitorata la concentrazione del composto organico volatile all'interno del box.

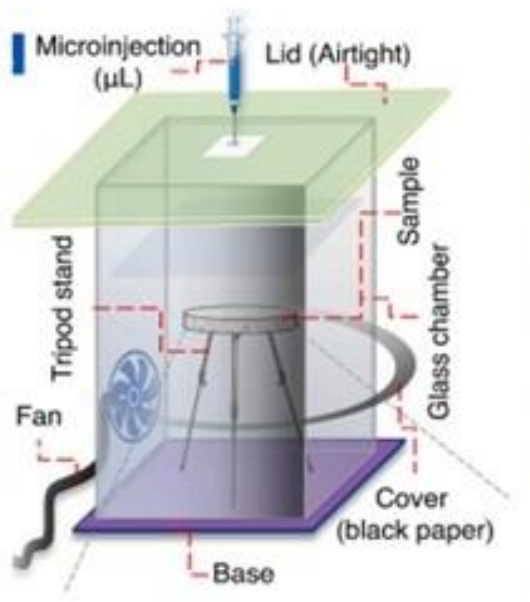


Figura 78: Schema di funzionamento della camera

I dati raccolti vengono trasmessi e registrati su un computer collegato al sistema di misura. Al termine del test, il campione viene rimosso dal box e contemporaneamente si rilevano la temperatura (T °C) e l'umidità relativa (U.R. %) utilizzando un termoigrometro, per avere un controllo delle condizioni ambientali (Figura 78).

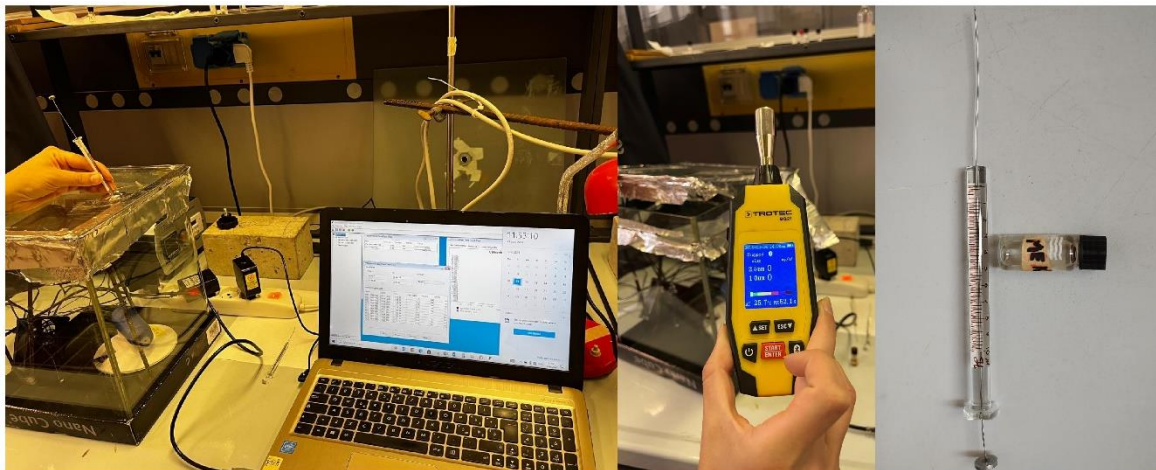


Figura 79: Apparato di svolgimento della prova, Termoigrometro, Microsiringa e MEK

Le prove di adsorbimento dei VOC sono state condotte in tre fasi distinte:

- Prima fase: sono stati testati sei campioni, tre con supporto in XPS e tre con supporto in canapa, utilizzando la pittura Keradecor White Plus.

- Seconda fase: gli stessi campioni sono stati abrasati per rimuovere la precedente pittura e successivamente trattati con il fissativo Luxens prima di applicare la pittura Iris Color con tutte le tempistiche previste dalla scheda tecnica.
- Terza fase: esecuzione delle prove confrontando un campione della precedente sperimentazione (MAMMUT) con 3 campioni rigenerati: 1 campione HEMP + UNIVPM (2) abraso, 1 campione XPS + UNIVPM (2) abraso e 1 campione XPS + UNIVPM (2) non abraso.

In tutte le fasi, i campioni rivestiti con la rispettiva finitura sono stati testati per valutarne la capacità di adsorbimento dei composti organici volatili. Al contrario, per i campioni rivestiti con la finitura UNIVPM, è stata eseguita un'unica prova di adsorbimento. Questo approccio ha consentito di confrontare l'efficacia delle diverse finiture e di analizzare le differenze nelle performance di adsorbimento dei VOC tra i vari trattamenti superficiali.

Pittura Keradecor White Plus

Tramite l'utilizzo della pittura Keradecor White Plus, come risultati finali otterremo 15 curve, di cui 3 relative al blank test e 12 relative ai diversi campioni. I grafici sono stati realizzati sia in base al tempo di acquisizione dati ed il rapporto tra la concentrazione ad ogni intervallo e quella massima iniziale (Grafico 5), sia in base al tempo di acquisizione dati e la concentrazione in termini di ppm, o parti per milione (Grafico 6).

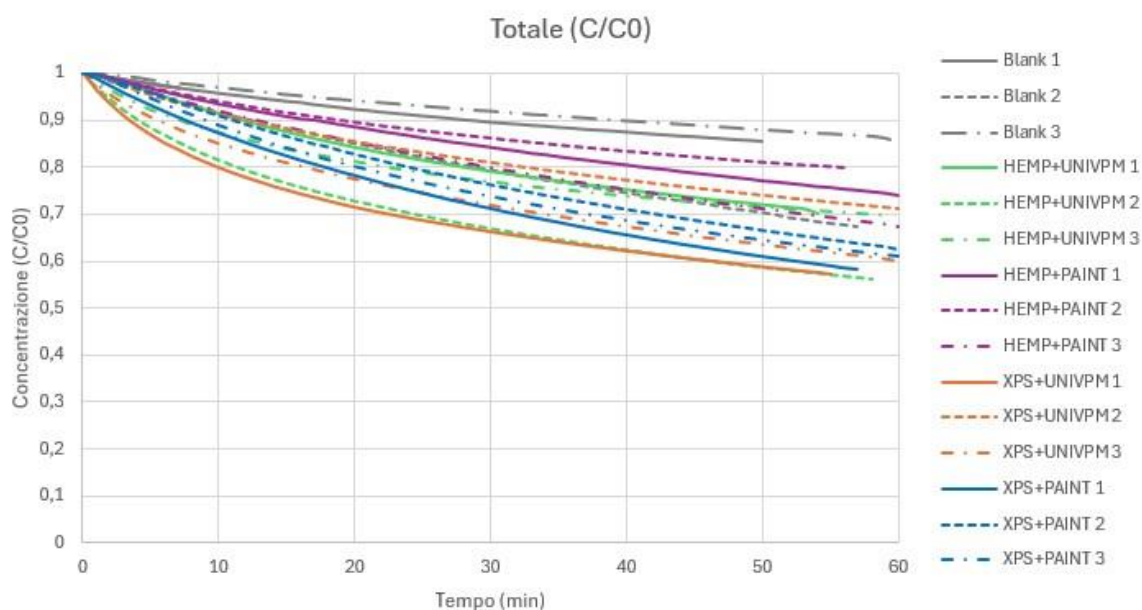


Grafico 5: Concentrazione (C/C0) di VOCs nel tempo

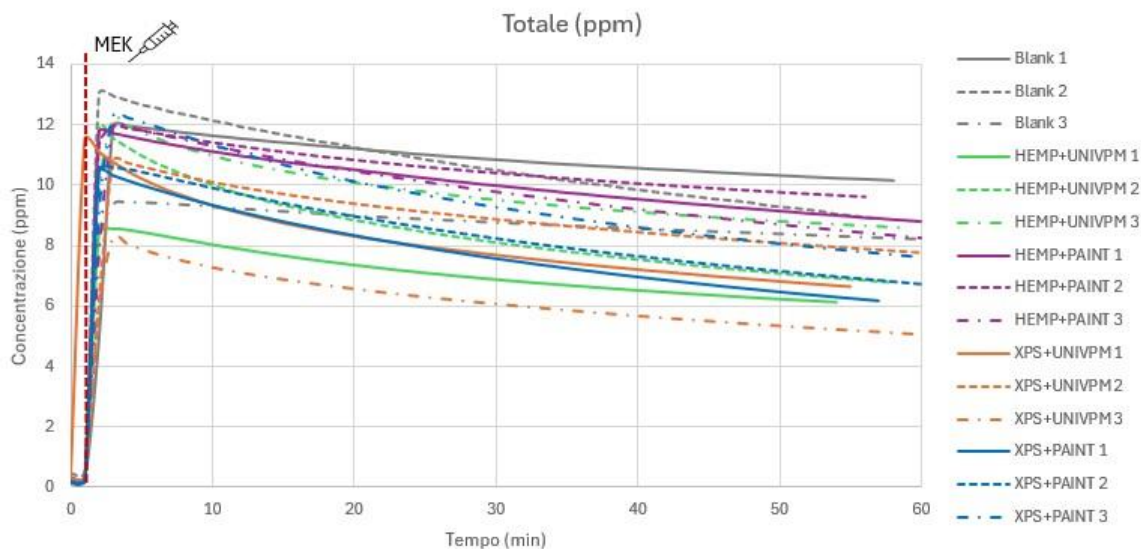


Grafico 6: Concentrazione (ppm) di VOCs nel tempo

Da questi due grafici è possibile ricavare la percentuale di assorbimento VOCs dei 12 provini testati, svolti tutti con lo stesso intervallo di acquisizione dati, facendo una media tra i valori ottenuti per ogni tipologia di campione al netto della media dei blank in percentuale (Grafico 7).

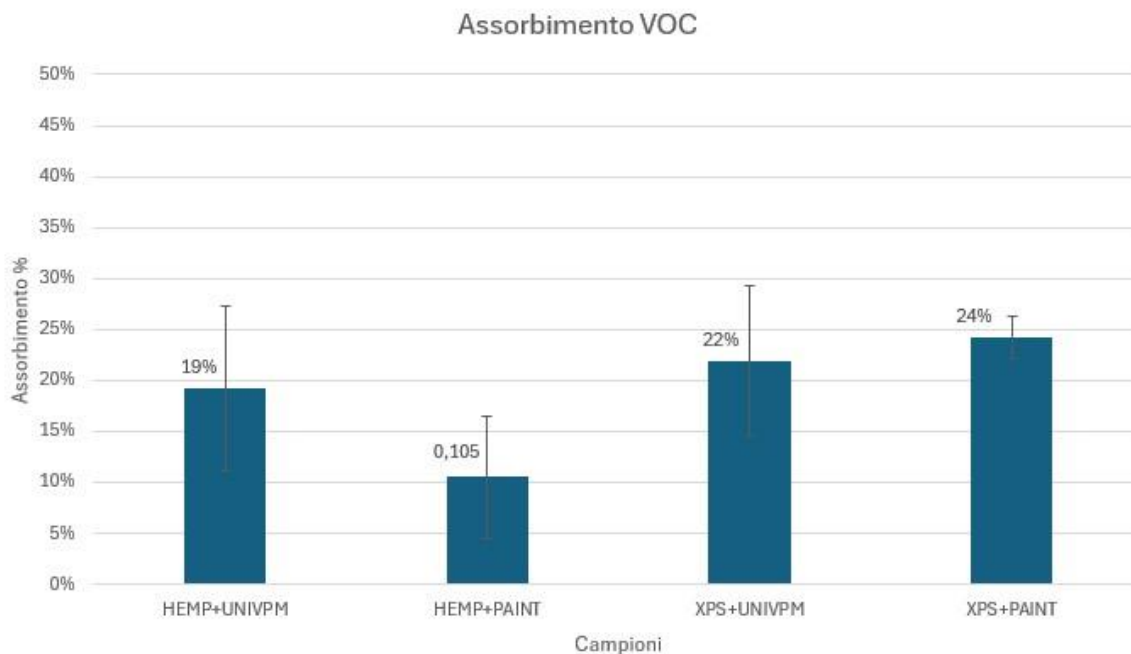


Grafico 7: Adsorbimento % VOCs

Si può notare che i campioni XPS + PAINT e XPS + UNIVPM, hanno una migliore capacità di adsorbimento degli inquinanti organici rispetto ai campioni con supporto in Canapa, infatti, le percentuali ottenute dalle due combinazioni sono maggiori.

Inoltre, è stato osservato che i campioni con la finitura UNIVPM non hanno mostrato la stessa capacità di assorbimento dei VOCs riscontrata nella precedente sperimentazione MAMMUT. Questo risultato ha portato a voler indagare per conoscerne il motivo.

Pittura Iris Color

Per effettuare un confronto con le due pitture, ovvero Keradecor White Plus e Iris Color, i campioni con entrambe le tipologie di supporto sono stati abrasati e privati della precedente vernice. Effettuata questa operazione sono stati puliti opportunamente e trattati con il primer fissativo per pittura Luxens e applicato secondo come previsto dalla scheda tecnica e dopodiché applicata la pittura Iris color in due mani con i tempi di asciugatura tra una mano e l'altra secondo quanto descritto dalla scheda tecnica.

I risultati sono stati integrati con i dati precedenti per permettere un confronto visivo diretto ottenendo 22 curve, di cui 4 relative ai blank test e 18 relative ai diversi campioni. I grafici sono stati realizzati sia in base al tempo di acquisizione dati ed il rapporto tra la concentrazione ad ogni intervallo e quella massima iniziale (Grafico 8), sia in base al tempo di acquisizione dati e la concentrazione in termini di ppm, o parti per milione (Grafico 9).

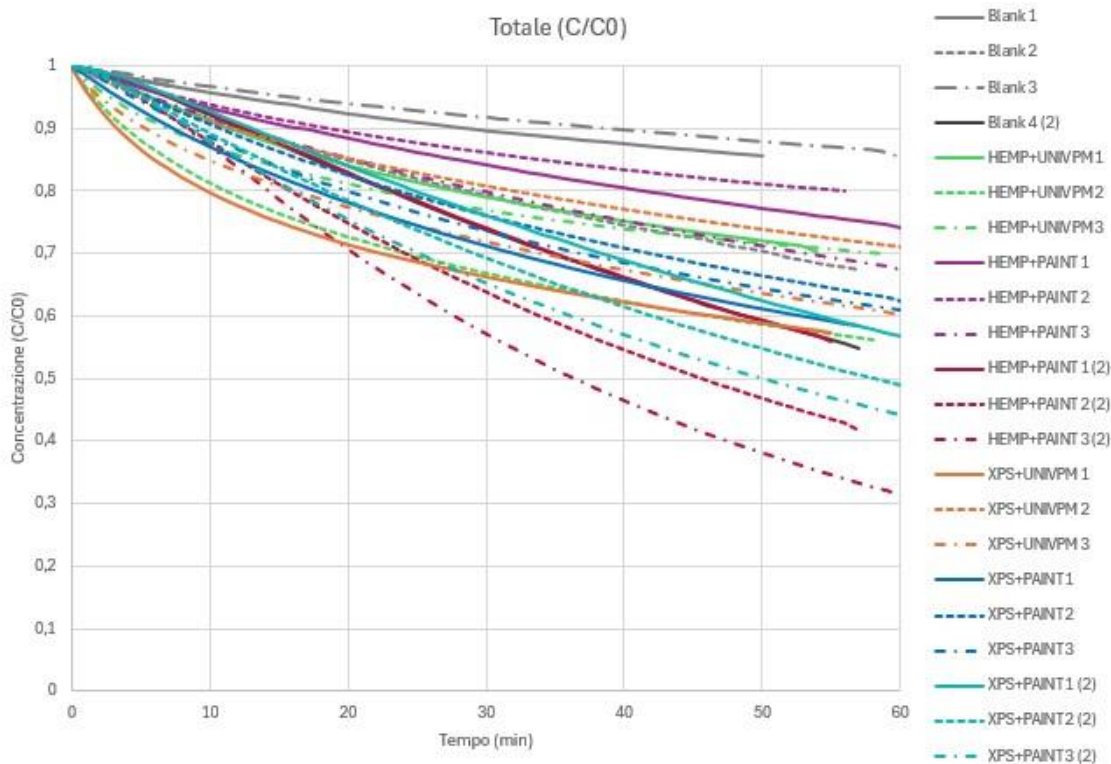


Grafico 8: Concentrazione (C/C0) di VOCs nel tempo

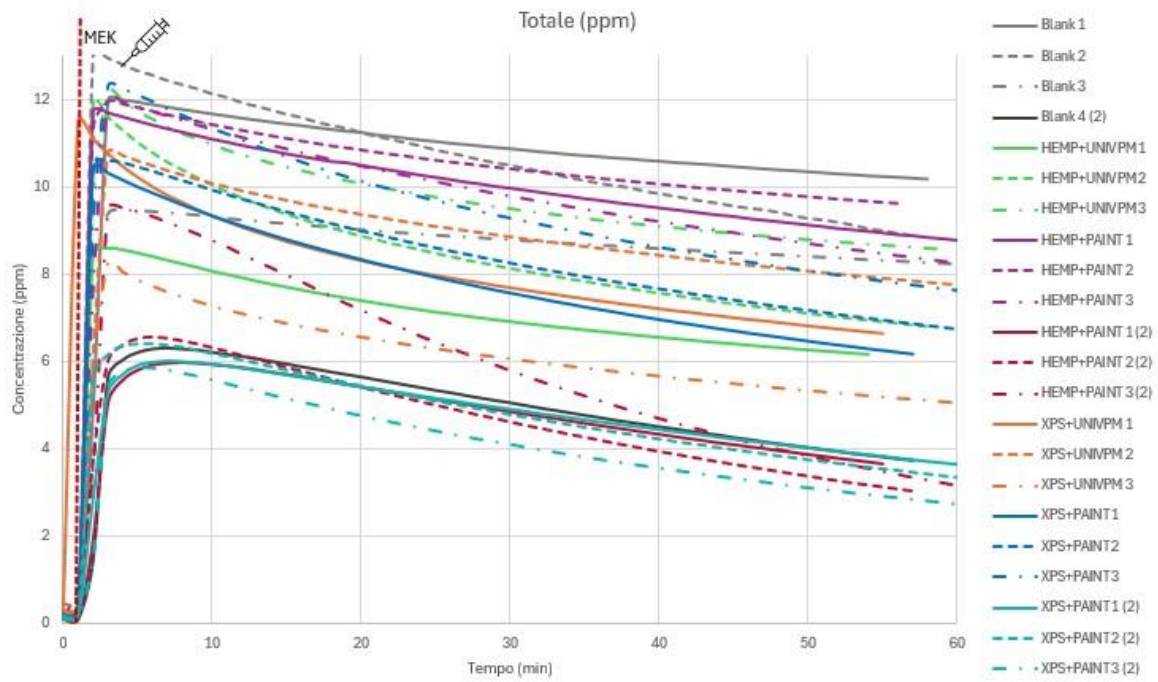


Grafico 9: Concentrazione (ppm) di VOCs nel tempo

Da qui si effettua una media tra i valori ottenuti per ogni tipologia di campione al netto della media dei blank per ricavare la percentuale di assorbimento dei VOCs (Grafico 10).

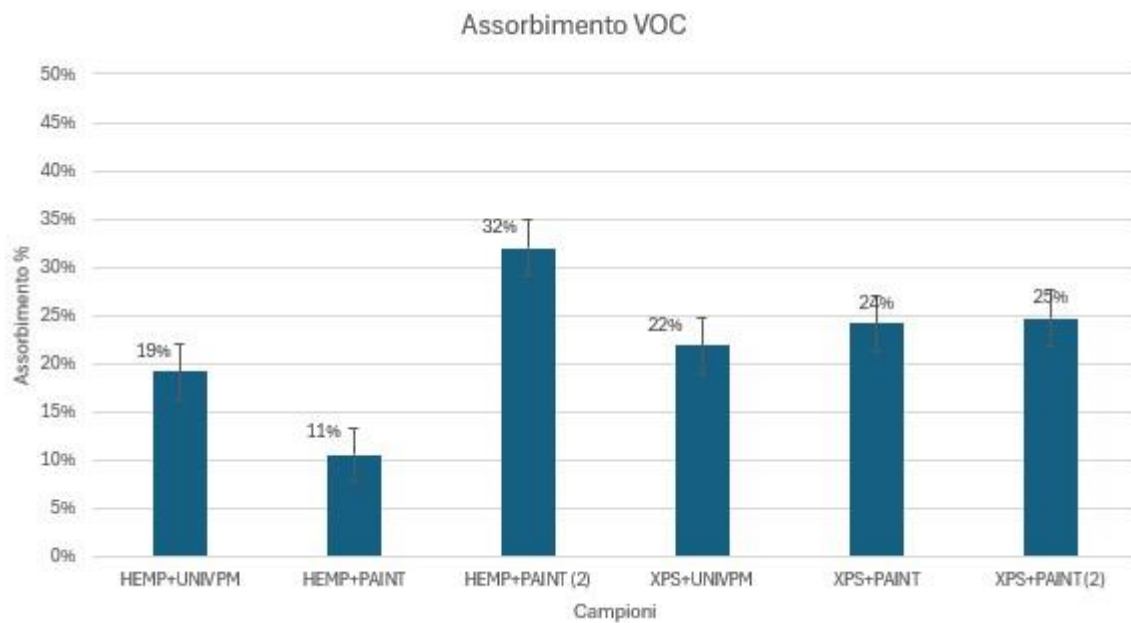


Grafico 10: Adsorbimento % VOCs

Ripetizione prova VOCs

Per poter indagare e avere un ulteriore confronto si è proceduti utilizzando un campione della precedente sperimentazione e rigenerando i campioni utilizzati nella corrente analisi mediante inserimento in stufa a 50 °C per 24 h.

I campioni in oggetto sono stati:

- 1 campione HEMP+UNIVPM (2) abraso di dimensioni 7 cm x 7 cm x 5,1 cm.
- 1 campione XPS+UNIVPM (2) abraso di dimensioni 7 cm x 7 cm x 5,1 cm.
- 1 campione XPS+UNIVPM (2) non abraso di dimensioni 7 cm x 7 cm x 5,1 cm.
- 1 campione da precedente sperimentazione (MAMMUT) D+UNI T1 (4).

Che hanno portato alla produzione dei seguenti grafici realizzati sia in base al tempo di acquisizione dati ed il rapporto tra la concentrazione ad ogni intervallo e quella massima iniziale di confronto, sia in base al tempo di acquisizione dati e la concentrazione in termini di ppm dei campioni con solo finitura UNIVPM (Grafico 11). Gli stessi grafici sono stati fatti considerando tutti i valori dei precedenti campioni con i valori dei campioni con finitura UNIVPM ritestati (Grafico 12).

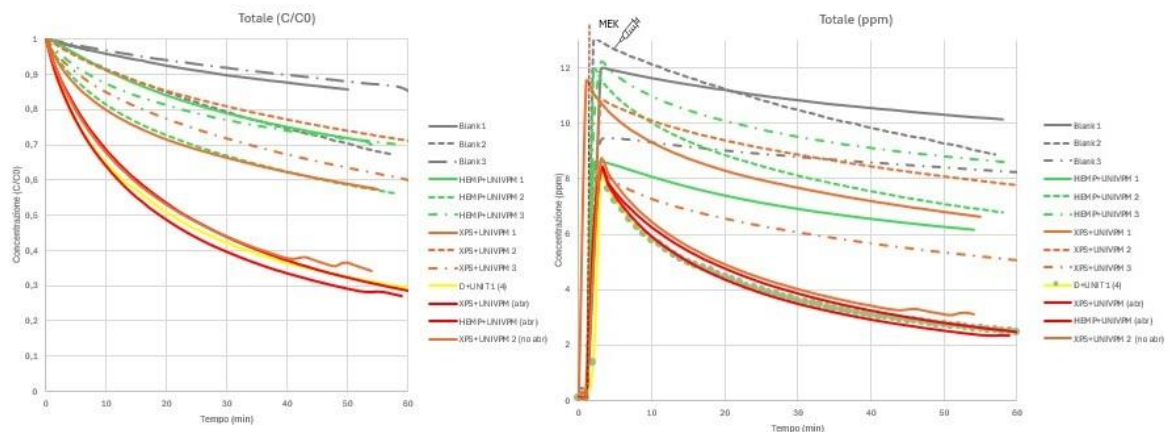


Grafico 11: Concentrazione in C/C0 e in ppm di VOCs nel tempo

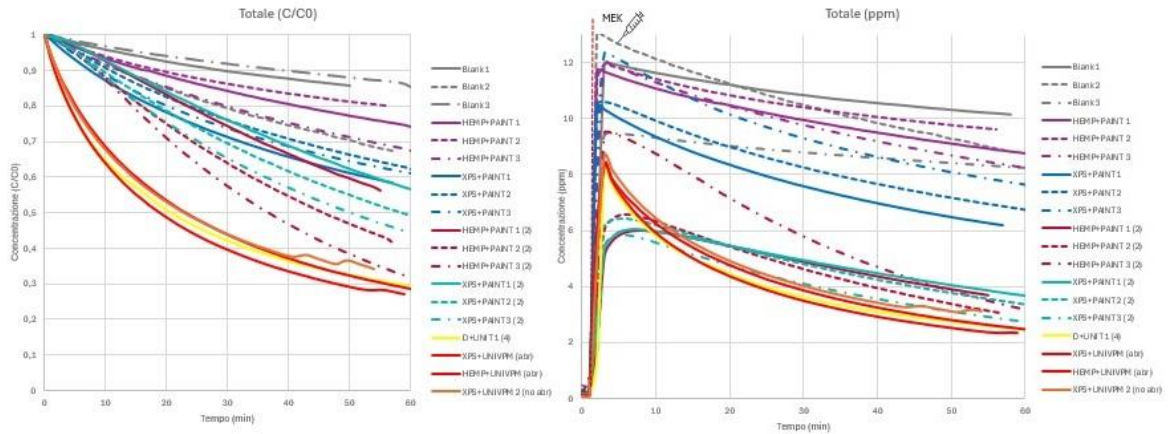


Grafico 12: Concentrazione in C/C0 e in ppm di VOCs nel tempo

Da qui si effettua una media tra i valori ottenuti per ogni tipologia di campione al netto della media dei blank per ricavare la percentuale di assorbimento dei VOCs (Grafico 13).

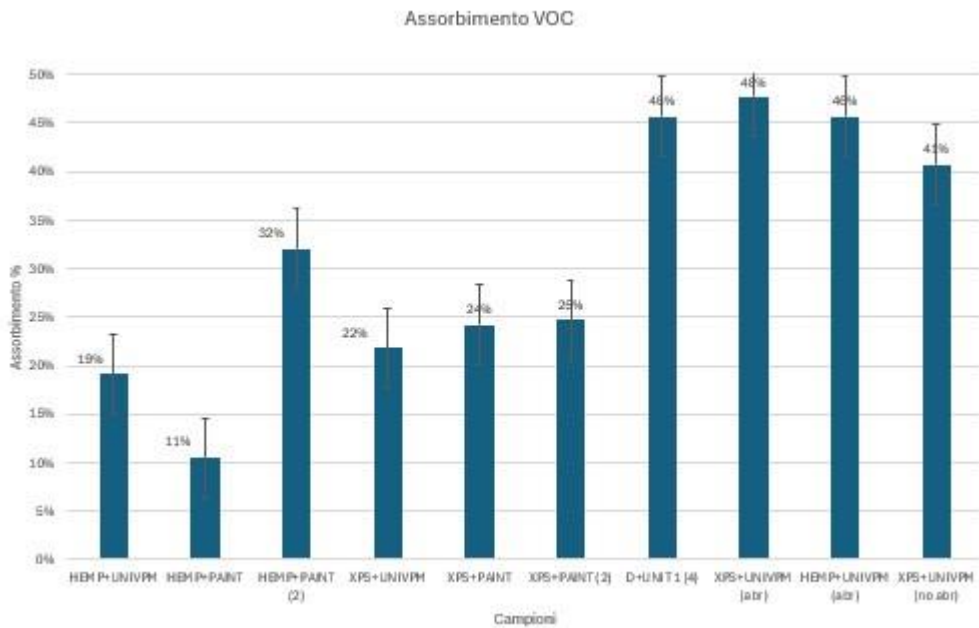


Grafico 13: Adsorbimento % VOCs

Dai risultati ottenuti si è osservato che né il substrato né l'abrasione influenzano significativamente l'assorbimento dei VOCs, né la differente concentrazione di MEK usata nel test MAMMUT (più concentrata) rispetto al test usato ora (meno concentrato) più simile alle condizioni reali. È emerso, invece, che il mancato assorbimento iniziale da parte dei campioni testati è attribuibile a un'asciugatura inadeguata visto che i campioni sono stati stagionati solo 10 – 15 gg. La presenza di acqua residua nella finitura ha infatti ostacolato il corretto assorbimento dei VOCs. Osserviamo infatti un incremento di assorbimento maggiore del 100% perché siamo passati ad una media in

percentuali del 20% (media di: HEMP+UNIVPM e XPS+UNIVPM) ad una del 45% (media di: HEMP+UNIVPM e XPS+UNIVPM abrasi, XPS+UNIVPM non abraso e D+UNI T1 (4)).

3.5 Attività fotocatalitica mediante NOx

La rimozione delle specie di NOx viene principalmente realizzata attraverso ossidazione catalitica. L'ossidazione catalitica è considerata una soluzione più sostenibile ed economica, suddividendosi in ossidazione termica e fotocatalitica. Quest'ultima è preferibile poiché funziona a temperatura ambiente, grazie all'uso di nanofotocatalizzatori come il biossido di titanio (TiO₂, presente all'interno della nostra finitura UNIVPM), che degrada gli ossidi di azoto (NOx) in composti innocui in presenza di luce UV.

Negli ultimi anni, si è sviluppata la tendenza a immobilizzare i fotocatalizzatori su materiali di finitura per interni, migliorando la qualità dell'aria in modo passivo e senza consumo di energia. Il TiO₂ è uno dei fotocatalizzatori più utilizzati grazie alla sua efficacia. Tuttavia, l'efficienza del processo dipende da vari fattori come la dimensione delle particelle, la stabilità termica e il metodo di sintesi. Alcuni studi recenti hanno dimostrato che le nanoparticelle di TiO₂ possono migliorare notevolmente la rimozione del NOx, soprattutto se combinate con leganti come la calce idraulica naturale (NHL, anch'essa presente nella nostra finitura UNIVPM), che offre tassi di degradazione più elevati rispetto al cemento.

La sintesi tradizionale del TiO₂, tuttavia, presenta sfide ambientali. Per questo motivo, l'attenzione si sta spostando verso metodi di produzione più sostenibili basati sulla chimica verde, che utilizzano materiali organici di scarto, come le foglie cadute, per ridurre l'impatto ambientale. L'utilizzo di nanoparticelle di TiO₂ in materiali di finitura rappresenta un promettente metodo per migliorare la qualità dell'aria interna, con l'obiettivo di rendere il processo più sostenibile attraverso tecniche di sintesi ecologiche.²⁹

Il profilo di ossidazione fotocatalitica degli NOx, nel nostro caso, è stato esaminato attraverso una serie di test su tutti i campioni realizzati così divisi:

- 3 campioni HEMP + PAINT Keradecor White Plus di dimensioni 7 cm x 7 cm x 4,8 cm (giugno 24).
- 3 campioni HEMP + PAINT Iris Color di dimensioni 7 cm x 7 cm x 4,8 cm.
- 3 campioni HEMP + UNIVPM di dimensioni 7 cm x 7 cm x 5,1 cm (giugno 24).

²⁹ Qaisar Maqbool, Natalia Czerwinska, Chiara Giosue, Simona Sabbatini, Maria Letizia Ruello, e Francesca Tittarelli. "New waste-derived TiO₂ nanoparticles as a potential photocatalytic additive for lime based indoor finishings.", Università Politecnica delle Marche, Department of 'Materials, Environmental Sciences and Urban Planning (SIMAU), *Journal of Cleaner Production* 373 (2022): 133853. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133853>.

- 3 campioni XPS + PAINT Keradecor White Plus di dimensioni 7 cm x 7 cm x 4,8 cm (giugno 24).
- 3 campioni XPS + PAINT Iris Color di dimensioni 7 cm x 7 cm x 4,8 cm.
- 3 campioni XPS + UNIVPM di dimensioni 7 cm x 7 cm x 5,1 cm (giugno 24).

Il test comprende sei fasi: stabilizzazione della concentrazione di NO_x, apertura del fotoreattore con inserimento del campione, leggera diminuzione della concentrazione di NO_x per adsorbimento, accensione della lampada UV o VIS con diminuzione della concentrazione di NO_x, ritorno ai livelli iniziali al termine dell'irradiazione.

L'esperimento è stato condotto all'interno di una camera di vetro trasparente, dove è stato collocato il campione (Figura 79). La camera è collegata ad un dispositivo (Figura 80) che misura continuamente la concentrazione di NO_x, con rilevazioni manuali effettuate a intervalli di 5 minuti.

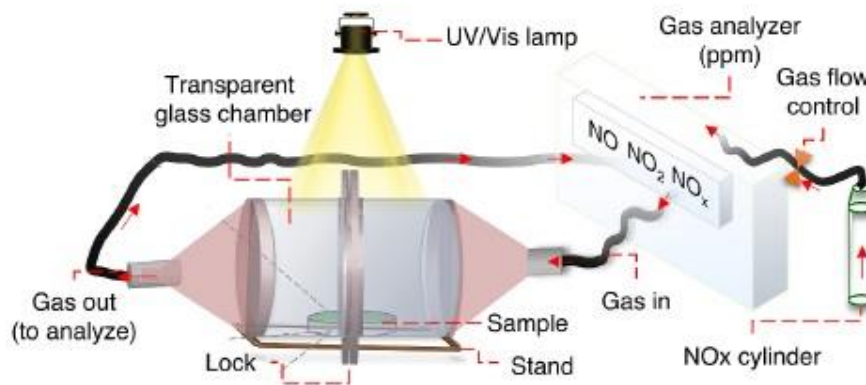


Figura 80: Schema dell'esecuzione della prova



Figura 81: Dispositivo di misurazione in continuo degli NO_x

Prima dell'esecuzione del test, viene effettuata la misurazione della radianza delle due lampade impiegate nel processo. La lampada VIS, utilizzata per l'illuminazione con luce visibile, ha uno spettro che copre un intervallo di lunghezze d'onda intorno a 400 nm, misurato tramite la sonda RAD. In parallelo, la lampada UV, utilizzata per l'illuminazione ultravioletta, opera in un intervallo di lunghezze d'onda di circa 315 nm, misurato con la sonda UVA (Figura 81). Queste misurazioni preliminari assicurano che le condizioni di illuminazione siano accuratamente controllate, permettendo di valutare correttamente l'effetto della radiazione sui campioni testati, in particolare in relazione alla degradazione dei NOx e al comportamento fotocatalitico dei materiali.

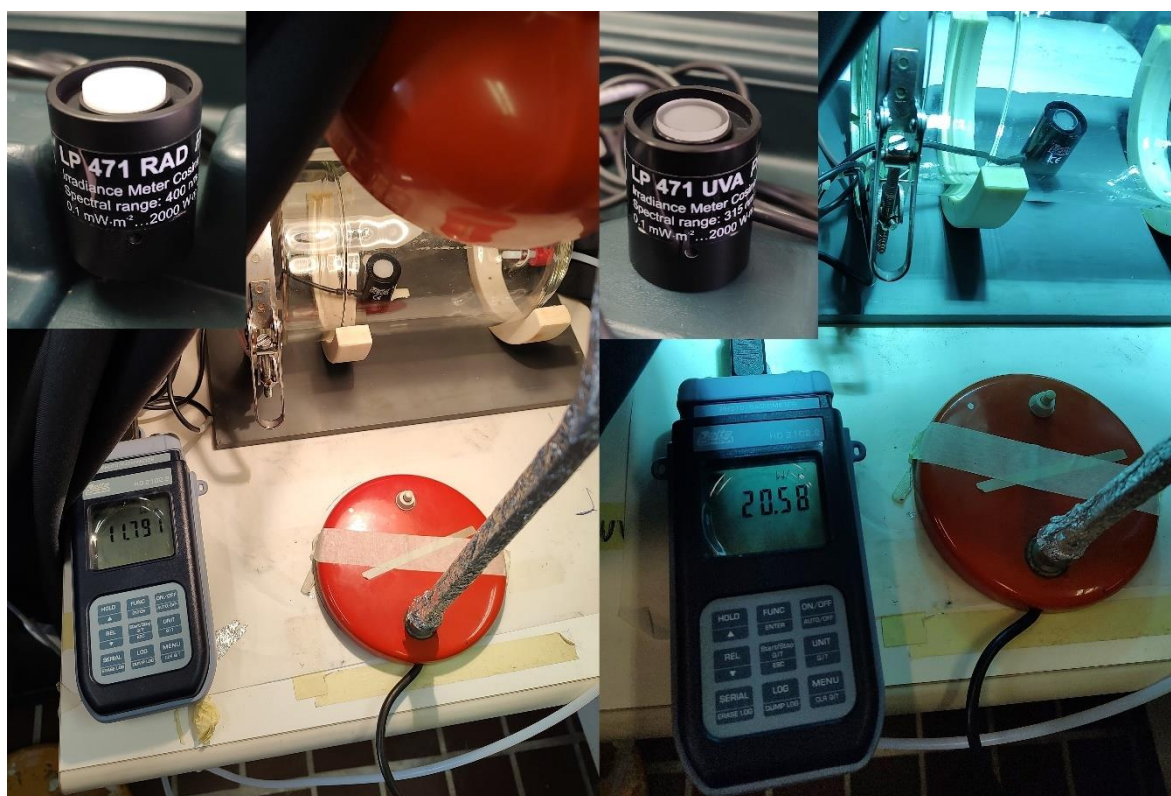


Figura 82: Lampada VIS e sonda RAD (sinistra), lampada UV e sonda UVA (destra)

Dopo aver stabilizzato la concentrazione di NOx all'accensione della macchina, viene inserito il campione nel fotoreattore. Una volta inserito, la concentrazione viene lasciata nuovamente stabilizzare. Quando si raggiunge una condizione di equilibrio, viene accesa la lampada VIS, e si osserva l'assorbimento da parte della finitura superficiale del campione. La lampada VIS rimane accesa per alcuni minuti, fino a quando non si osserva una costanza della concentrazione di NOx. Successivamente, la lampada viene spenta e il campione viene lasciato al buio per 15 minuti.

Dopo il periodo di oscuramento, viene accesa la lampada UV, a questo punto si osserva il processo di degradazione degli NOx, particolarmente evidente nei campioni con la finitura UNIVPM. Questa fase di degradazione dura circa 20-30 minuti, al cui termine di questo periodo, la lampada

UV viene spenta e la concentrazione di NOx torna a stabilizzarsi, segnando la conclusione della prova (Figura 82).

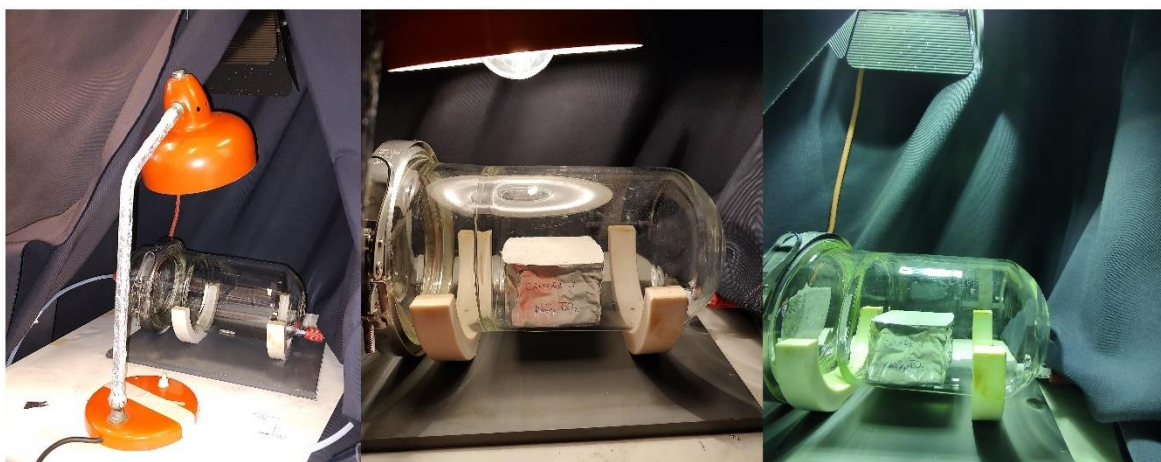


Figura 83: Inserimento del campione nella camera, accensione lampada VIS e accensione lampada UV

La degradazione degli NOx è stata osservata solo nei campioni contenenti l'agente fotocatalitico TiO₂ (finitura UNIVPM).³⁰

Ed anche in questo caso, come per i VOCs la prova è stata ripetuta su due tipi di vernice: Keradecor White Plus e Iris Color.

Pittura Keradecor White Plus

Abbiamo ottenuto quattro grafici come risultato: i primi due mostrano la concentrazione di NOx per ciascun campione, differenziata in base al tipo di lampada utilizzata VIS (Grafico 14) o UV (Grafico 15).

³⁰ Qaisar Maqbool, Natalia Czerwinska, Chiara Giosue, Simona Sabbatini, Maria Letizia Ruello, e Francesca Tittarelli. "New waste-derived TiO₂ nanoparticles as a potential photocatalytic additive for lime based indoor finishings.", Università Politecnica delle Marche, Department of 'Materials, Environmental Sciences and Urban Planning (SIMAU), *Journal of Cleaner Production* 373 (2022): 133853. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133853>.

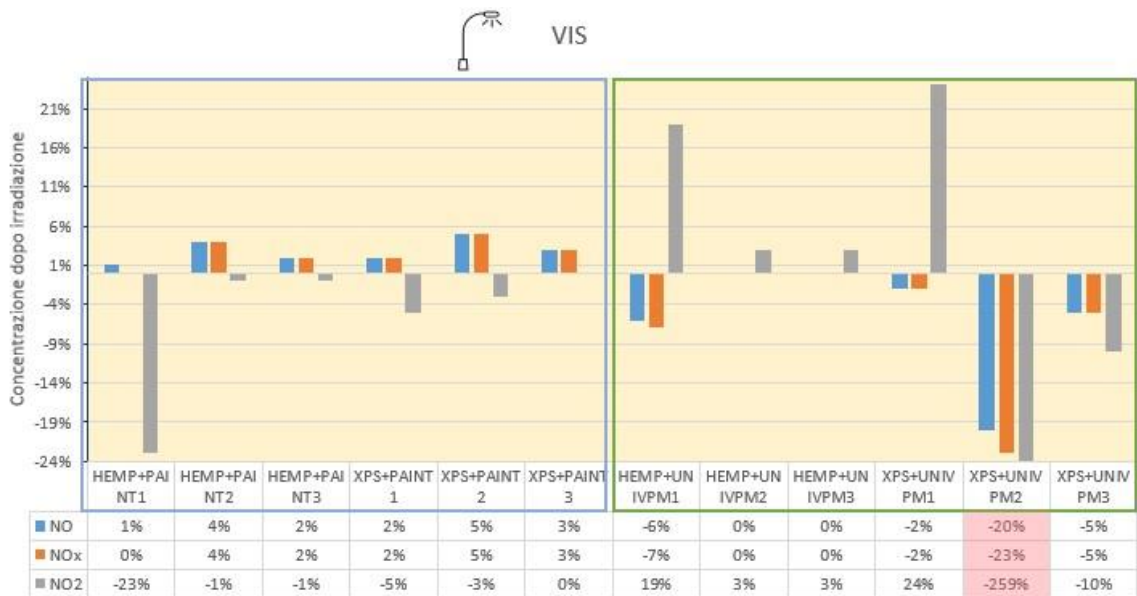


Grafico 14: Concentrazione NOx per ogni campione con lampada VIS

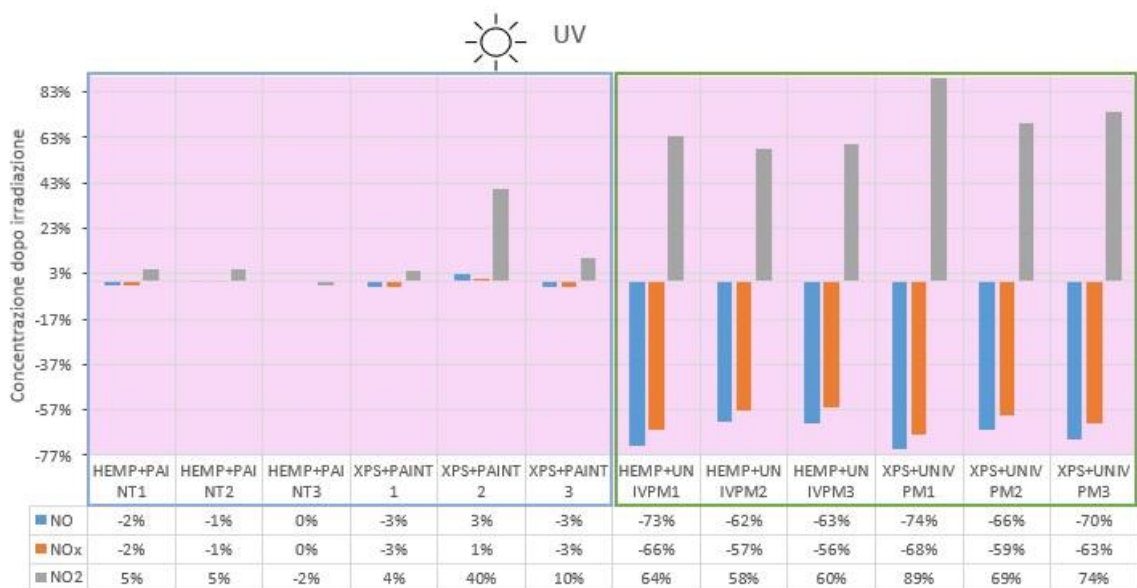


Grafico 15: Concentrazione NOx per ogni campione con lampada UV

Gli altri due grafici presentano la media della concentrazione di NOx per ogni tipologia di campione, offrendo una visione complessiva delle prestazioni dei materiali testati rispetto alla riduzione di NOx sotto le diverse condizioni di illuminazione (Grafici 16 e 17).

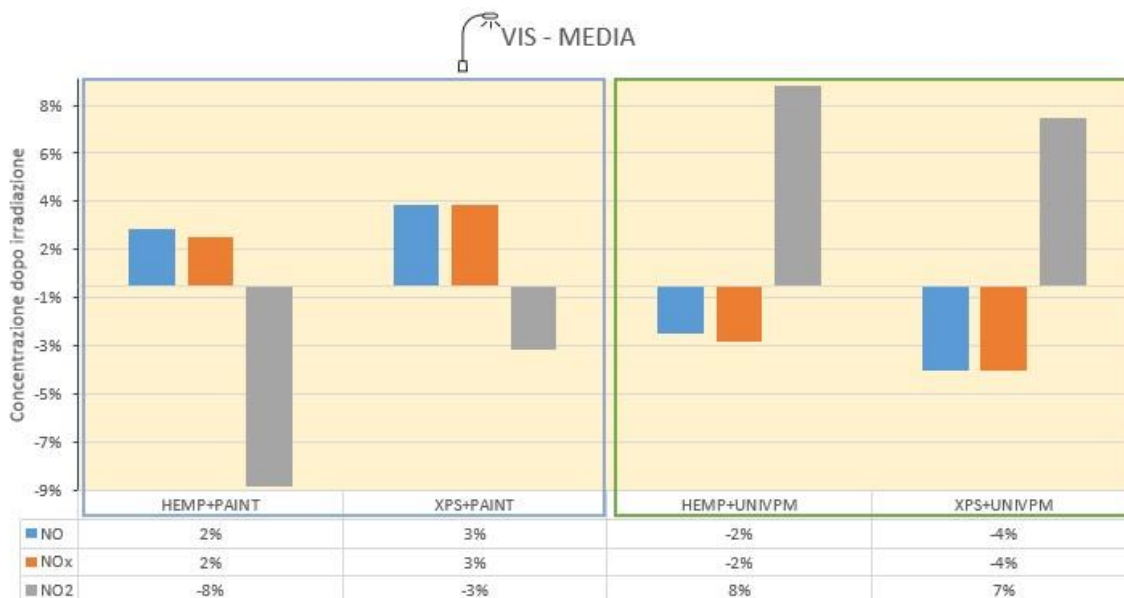


Grafico 16: Concentrazione NOx per ogni tipologia di campione con lampada VIS

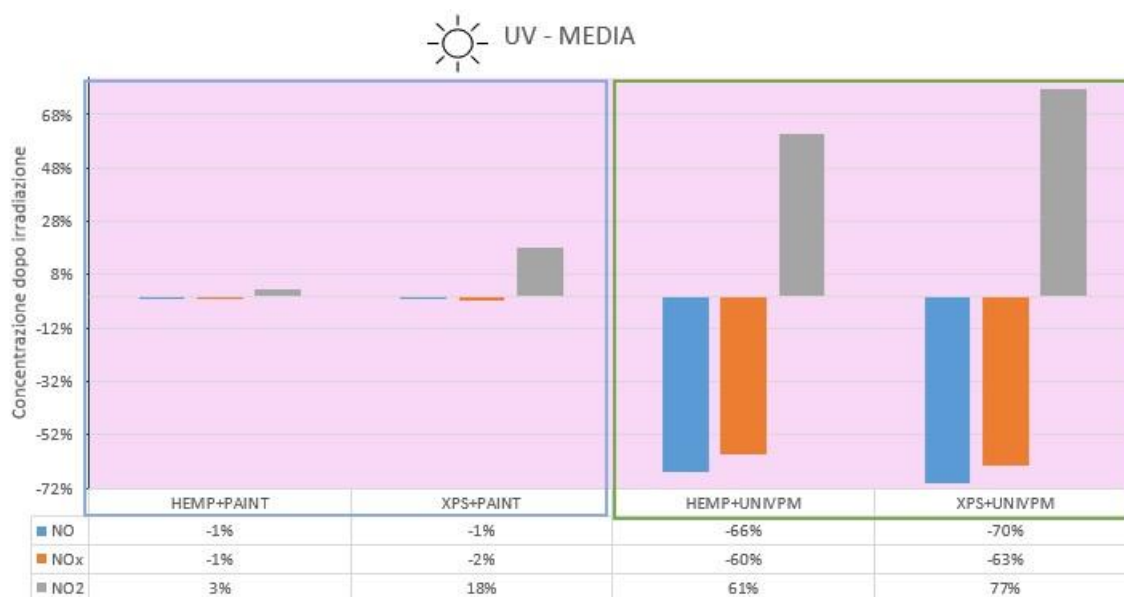


Grafico 17: Concentrazione NOx per ogni tipologia di campione con lampada UV

Questi grafici consentono di confrontare l'efficacia dei campioni nel degradare i NOx in base alla lampada utilizzata e alla loro composizione.

Pittura Iris Color

Gli stessi test sono stati ripetuti utilizzando la pittura Iris Color, dopo aver raschiato accuratamente le superfici dei campioni per rimuovere la vernice precedente. Successivamente, sono state rispettate le modalità e le tempistiche di applicazione per ciascun strato di pittura. I risultati ottenuti con la nuova finitura sono stati valutati in modo analogo, confrontando la capacità dei campioni di

ridurre la concentrazione di NOx sotto le diverse condizioni di illuminazione (Grafici 18, 19, 20 e 21), garantendo così una comparazione diretta con i dati precedenti.



Grafico 18: Concentrazione NOx per ogni campione con lampada VIS

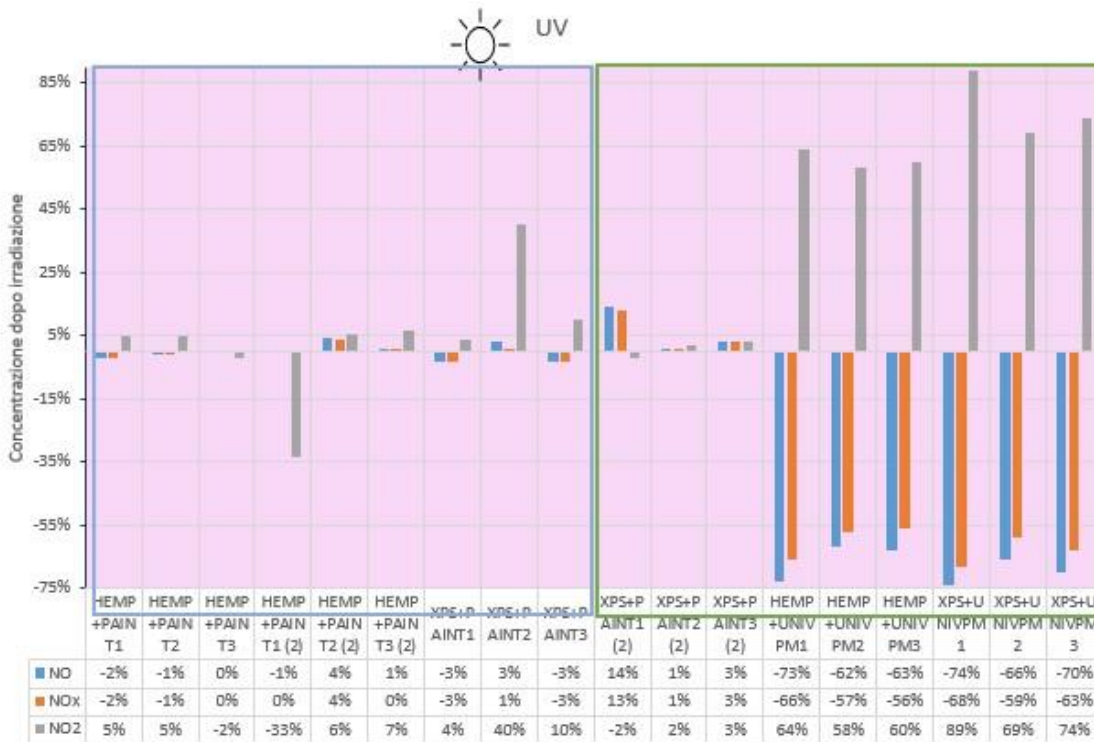


Grafico 19: Concentrazione NOx per ogni campione con lampada UV

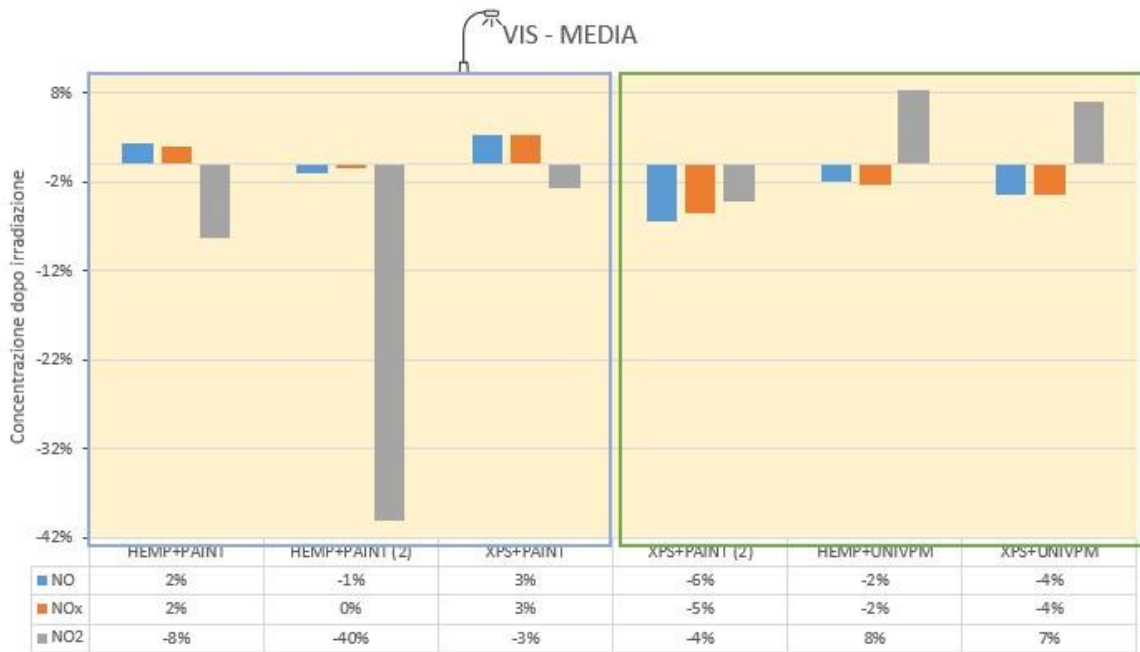


Grafico 20: Concentrazione NOx per ogni tipologia di campione con lampada VIS



Grafico 21: Concentrazione NOx per ogni tipologia di campione con lampada UV

3.6 Permeabilità al vapore

La norma descrive un metodo per determinare la permeabilità al vapore d'acqua di malte per intonaco, secondo il prEN 998-1, attraverso un test in condizioni di flusso stazionario. Questo metodo si applica a campioni di malta di forma discoidale, nel nostro caso con diametro (ϕ) di 16,8 cm, con uno spessore uniforme compreso tra 10 mm e 30 mm, nel nostro caso 5,1 cm per i campioni con supporto in canapa e 4,8 cm con supporto in XPS.

I campioni di malta sono stati sigillati con silicone lateralmente e su contenitori circolari contenenti una soluzione salina satura di nitrato di potassio (KNO_3), la quale garantisce un'umidità relativa costante del 93,2% a 20 °C all'interno del recipiente (Figura 83).



Figura 84: Contenitori circolari con soluzione salina satura di nitrato di potassio

Questa soluzione permette di mantenere stabile la pressione del vapore all'interno del contenitore, mentre i campioni vengono collocati in una camera di prova a temperatura controllata (20 ± 2 °C) con un'umidità relativa di $95 \pm 5\%$ o $50 \pm 5\%$, a seconda delle condizioni di prova. Nel nostro caso sarà utilizzata un U.R. del 50% perché effettueremo delle prove ad alta umidità (Figura 84).



Figura 85: Campioni sigillati su contenitori con soluzione salina satura

La differenza di umidità relativa tra l'interno del contenitore e l'esterno crea un gradiente di vapore acqueo, che attraversa il campione di malta in condizioni di flusso stazionario. Questo flusso di vapore viene monitorato e valutato attraverso la misurazione della variazione di massa dei contenitori, eseguita ogni 24 ore. Quando la variazione di massa si stabilizza e tre punti successivi si dispongono su una linea retta, si considera che il sistema ha raggiunto la condizione di flusso stazionario, e la quantità di vapore che attraversa il campione diventa costante.

Ai fini della presente norma, si applicano le seguenti definizioni:

- Permeanza al vapore acqueo: è il flusso di vapore acqueo che passa attraverso il campione in condizioni stazionarie, riferito a una superficie unitaria e a una differenza unitaria della tensione di vapore.
- Permeabilità al vapore acqueo: è la permeanza moltiplicata per lo spessore del campione.

Le fasi della prova comprendono:

- La preparazione dei campioni di malta sigillandoli sui contenitori di prova riempiti con la soluzione satura di nitrato di potassio e sigillando anche i bordi esterni del campione.
- Posizionamento dei contenitori in una camera a temperatura e umidità controllata (20 °C e U.R. 50%).

La differenza di tensione di vapore tra l'interno e l'esterno del contenitore induce un flusso di vapore attraverso il campione. Ad intervalli di cadenza giornaliera il sistema provino-contenitore è stato pesato fino al raggiungimento delle condizioni di stazionarietà, cioè fino al raggiungimento di variazioni di massa costanti nel tempo. Infatti, a causa della differente pressione parziale del vapore tra l'interno del recipiente e la camera climatizzata si verifica un trasporto di vapore attraverso i provini. Per ogni provino è stata calcolata la velocità di variazione di massa Δm_{12} dalla seguente formula:

$$\Delta m_{12} = \frac{m_2 - m_1}{t_2 - t_1}$$

Dove:

- Δm_{12} è la variazione della massa nel tempo per una singola determinazione [kg/s].
- m_1 è la massa del sistema al tempo t_1 [kg].
- m_2 è la massa del sistema al tempo t_2 [kg].
- t_1 e t_2 sono i tempi di misurazione successivi [s].

Mentre il valore di μ (o fattore di resistenza al vapore) viene calcolato dalla seguente formula:

$$\mu = \frac{\delta_a}{\delta_m}$$

Dove:

- μ è il fattore di resistenza al vapore.
- δ_a è il coefficiente di permeabilità al vapore acqueo nell'aria, che ha un valore fisso di $2 \times 10^{-10} \text{ kg/m}\cdot\text{s}\cdot\text{Pa}$ a 20°C .
- δ_m è il coefficiente di permeabilità al vapore del materiale considerato, calcolato in base alle misurazioni sperimentali.

Questo metodo fornisce una valutazione precisa delle proprietà di permeabilità delle malte, utile per determinarne l'efficacia in applicazioni di intonacatura, specialmente in condizioni che richiedono specifiche capacità di traspirabilità.³¹

La prova è stata effettuata sui campioni realizzati così divisi:

- 3 campioni HEMP + PAINT Keradecor White Plus di dimensioni $\varnothing 16,8 \text{ cm} \times 4,8 \text{ cm}$ (giugno 24).
- 3 campioni HEMP + PAINT (2) Iris Color di dimensioni $\varnothing 16,8 \text{ cm} \times 4,8 \text{ cm}$.
- 3 campioni HEMP + UNIVPM di dimensioni $\varnothing 16,8 \text{ cm} \times 5,1 \text{ cm}$ (giugno 24).
- 3 campioni XPS + PAINT Keradecor White Plus di dimensioni $\varnothing 16,8 \text{ cm} \times 4,8 \text{ cm}$ (giugno 24).
- 3 campioni XPS + PAINT (2) Iris Color di dimensioni $\varnothing 16,8 \text{ cm} \times 4,8 \text{ cm}$.
- 3 campioni XPS + UNIVPM di dimensioni $\varnothing 16,8 \text{ cm} \times 5,1 \text{ cm}$ (giugno 24).

Ed anche in questo caso, come per i VOCs e gli NOx la prova è stata ripetuta su due tipi di vernice: Keradecor White Plus e Iris Color.

Pittura Keradecor White Plus

I risultati ottenuti con la pittura Keradecor White Plus sono riportati nei seguenti grafici, che indicano rispettivamente la variazione di massa nel tempo (Grafico 22) e il fattore di resistenza igroscopica μ tra i diversi provini (Grafico 23). Questi grafici forniscono un'analisi comparativa del

³¹ UNI EN 1015-19:2000

comportamento igroscopico dei campioni e del loro assorbimento e rilascio di umidità nel corso del tempo.

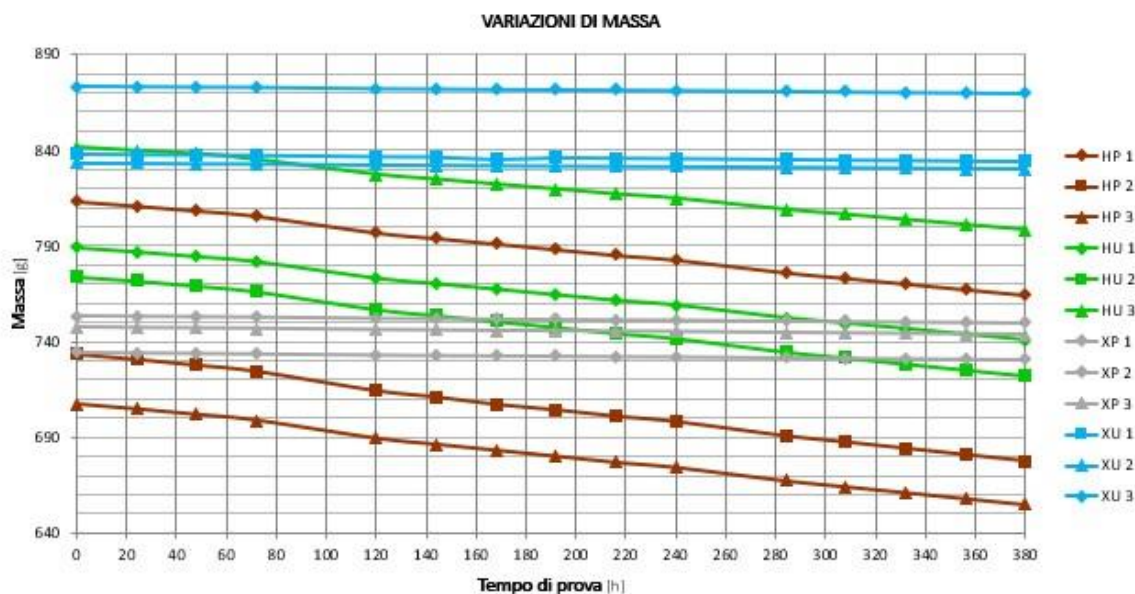


Grafico 22: Dati sperimentali della variazione di massa con i diversi campioni

Fattore di resistenza alla diffusione del vapor acqueo μ

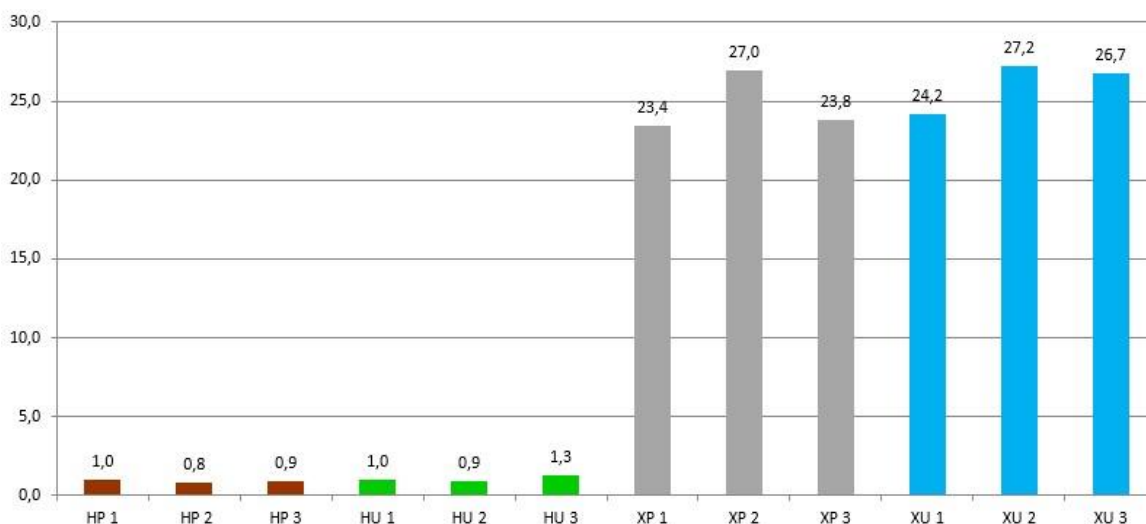


Grafico 23: Confronto fattori di resistenza igroscopica μ dei diversi campioni

Pittura Iris Color

Lo stesso test è stato ripetuto utilizzando la pittura Iris Color, dopo aver raschiato accuratamente le superfici dei campioni per rimuovere la vernice precedente. Successivamente, sono state seguite le modalità e le tempistiche di applicazione per ciascun strato di pittura. I risultati ottenuti con la nuova finitura sono stati valutati in modo analogo, confrontando la permeabilità al vapore dei

campioni. Questo ha permesso di effettuare una comparazione diretta con i dati precedenti, analizzando come la nuova pittura influenzi la traspirabilità e le proprietà igroscopiche dei materiali testati (Grafici 24 e 25).

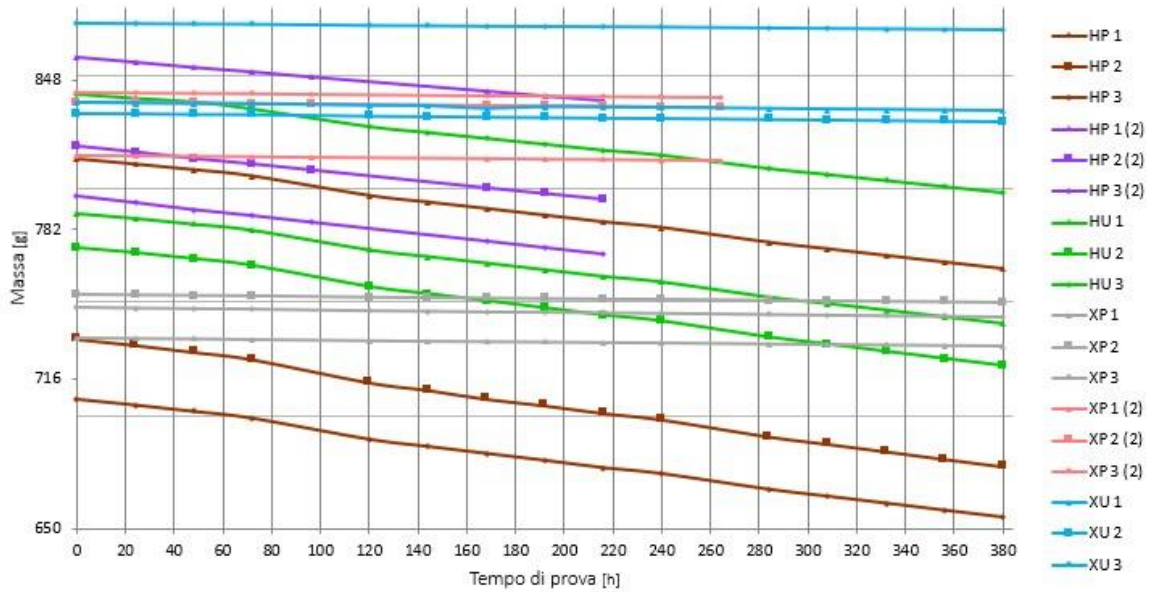


Grafico 24: Dati sperimentali della variazione di massa con i diversi campioni

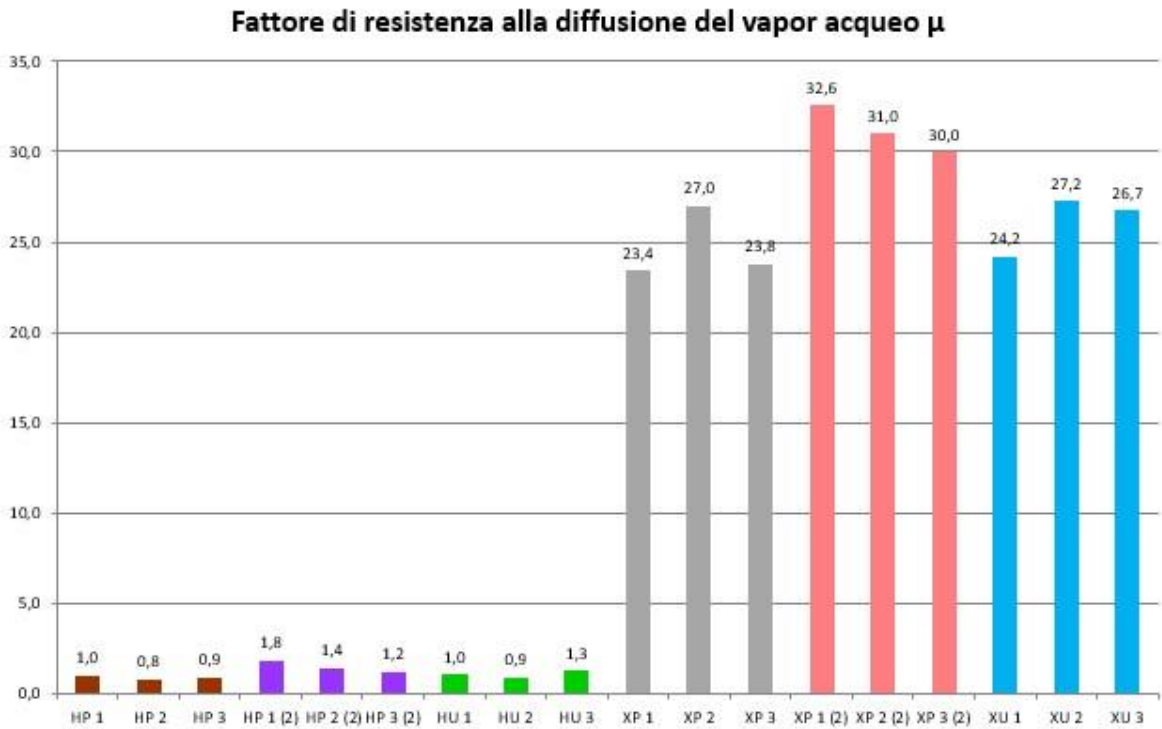


Grafico 25: Confronto fattori di resistenza igroscopica μ dei diversi campioni

3.7 MBV (Moisture Buffer Value/ Capacità Igrometrica)

Il documento "Moisture Buffering of Building Materials" del progetto NORDTEST si focalizza sullo sviluppo di un metodo standard per misurare la capacità di buffering dell'umidità nei materiali da costruzione, definita dal Moisture Buffer Value (MBV). Questo parametro è essenziale per valutare come i materiali assorbano e rilascino umidità, contribuendo a stabilizzare il microclima interno degli edifici. L'umidità interna influisce sul comfort degli occupanti e sulla salute degli edifici: i materiali in grado di tamponare l'umidità aiutano a mantenere un livello più stabile, riducendo estremi di secchezza in inverno e di umidità in estate.

Il MBV è calcolato in condizioni stabili ed è un importante indicatore delle proprietà igroscopiche del materiale. Il test prevede l'esposizione dei campioni a variazioni di umidità e la registrazione della quantità di vapore acqueo assorbito e rilasciato.

Nella nostra applicazione, i campioni sono:

- 3 campioni HEMP + PAINT Keradecor White Plus di dimensioni 15 cm x 15 cm x 4,8 cm (giugno 24).
- 3 campioni HEMP + PAINT (2) Iris Color di dimensioni 15 cm x 15 cm x 4,8 cm.
- 3 campioni HEMP + UNIVPM di dimensioni 15 cm x 15 cm x 5,1 cm (giugno 24).
- 3 campioni XPS + PAINT Keradecor White Plus di dimensioni 15 cm x 15 cm x 4,8 cm (giugno 24).
- 3 campioni XPS + PAINT (2) Iris Color di dimensioni 15 cm x 15 cm x 4,8 cm
- 3 campioni XPS + UNIVPM di dimensioni 15 cm x 15 cm x 5,1 cm (giugno 24).

Questi sono stati parzialmente sigillati con silicone e scotch in alluminio per esporre solo la superficie con la pittura o la finitura UNIVPM ai cambiamenti di umidità (Figura 85), e il loro peso è monitorato regolarmente. La variazione di peso indica la quantità di umidità assorbita o rilasciata in risposta alle variazioni di umidità relativa (U.R.).



Figura 86: Campioni sigillati lateralmente e inferiormente con silicone e scotch in alluminio

Prima del test, i campioni vengono pre-condizionati a un'U.R. del 50% per 24 ore, quindi esposti a variazioni controllate in una camera climatica (Figura 86). L'umidità oscilla tra il 75% e il 33% in cicli di 8 ore a U.R. elevata e 16 ore a U.R. bassa, con una temperatura costante di 20°C.



Figura 87: Campioni nella camera climatica

Durante il test, si registrano guadagni di peso (assorbimento) e perdite di peso (desorbimento) per ogni ciclo. Questi dati vengono utilizzati per calcolare il MBV, che esprime la capacità media di buffering dell'umidità del materiale su almeno tre cicli stabili.

$$MBV = \frac{G(t)}{\Delta RH}$$

Dove:

- $G(t)$ è l'umidità accumulata (in kg/m²) durante un certo intervallo di tempo t .
- A è l'area esposta (in m²).
- ΔRH è la variazione di umidità relativa.

Il risultato è espresso come la quantità di umidità assorbita o rilasciata per metro quadrato di superficie del materiale, normalizzata rispetto alla variazione percentuale di U.R.

La Moisture Buffering Capacity è sempre più rilevante nella progettazione edilizia, poiché migliora la qualità dell'aria interna in modo passivo, riducendo l'uso di sistemi attivi di condizionamento. Il MBV è uno strumento pratico per valutare come i materiali da costruzione regolano l'umidità interna, particolarmente utile in applicazioni che richiedono un controllo passivo del clima, come nei musei o in contesti con necessità di umidità stabile.³²

Anche qui, come per i VOCs, gli NOx e la permeabilità al vapore, la prova è stata ripetuta su due tipi di vernice: Keradecor White Plus e Iris Color.

Pittura Keradecor White Plus

I risultati ottenuti con la pittura Keradecor White Plus sono illustrati nei seguenti grafici che evidenziano le proprietà igroscopiche dei campioni mostrando in uno i cicli di vapore acqueo assorbito e rilasciato dai singoli campioni (Grafico 26) e nell'altro la media dell'MBV per ogni tipo di campione nei cicli di variazione di U.R. (Grafico 27). Questo permette di valutare la capacità dei campioni di tamponare l'umidità, fornendo indicazioni sulle loro prestazioni igroscopiche nel tempo.

³² Rode, Carsten; Peuhkuri, Ruut Hannele; Mortensen, Lone Hedegaard; Hansen, Kurt Kielsgaard; Time, Berit; Gustavsen, Arild; Ojanen, Tuomo; Ahonen, Jarkko; Svennberg, Kaisa; Arfvidsson, Jesper. "Moisture Buffering of Building Materials", Technical University of Denmark, Department of Civil Engineering. BYG Report No. R-127, 2005, pre-print version.

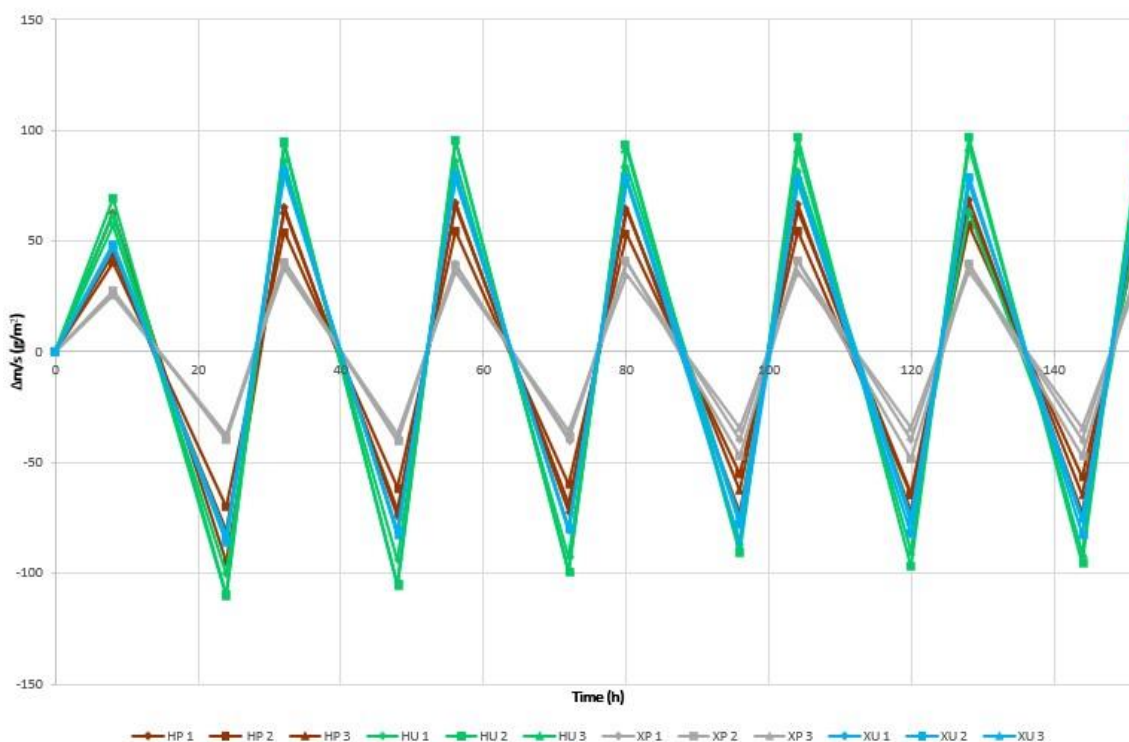


Grafico 26: Cicli di vapore acqueo assorbito e rilasciato dai singoli campioni

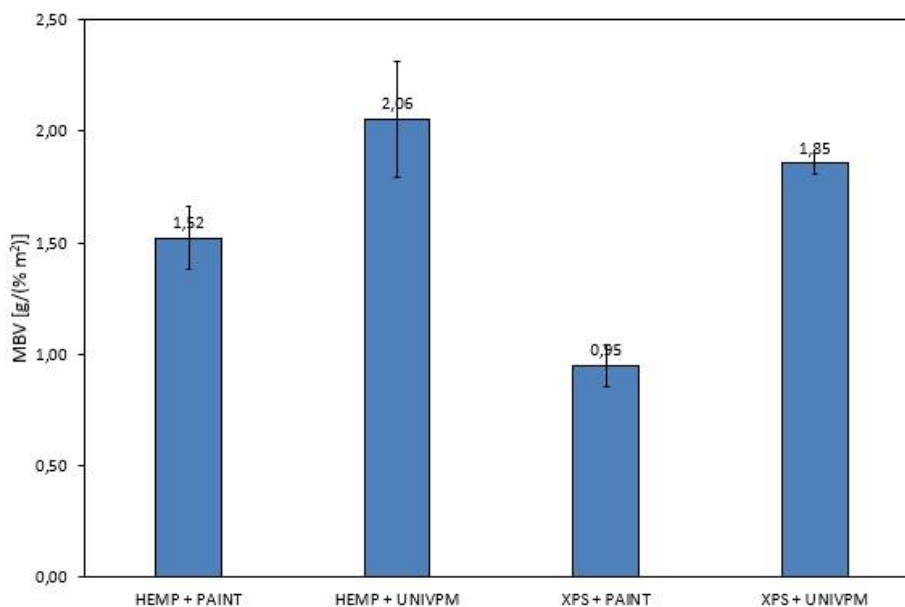


Grafico 27: Media MBV per ogni tipo di campione nei cicli di variazione di U.R.

Pittura Iris Color

Allo stesso modo, come per le prove sui VOCs, NOx e permeabilità, i campioni sono stati accuratamente abradi per rimuovere la vernice precedente, puliti e trattati con fissativo e pittura, seguendo le indicazioni delle schede tecniche. I grafici relativi alla pittura Keradecor White Plus

sono stati integrati con i risultati della pittura Iris Color, mostrando sia l'andamento dei cicli di assorbimento e rilascio del vapore per ogni singolo campione (Grafico 28), sia l'andamento medio per ogni tipologia di campione, calcolato sulla base della media dell'MBV dei tre provini per ogni gruppo (Grafico 29).

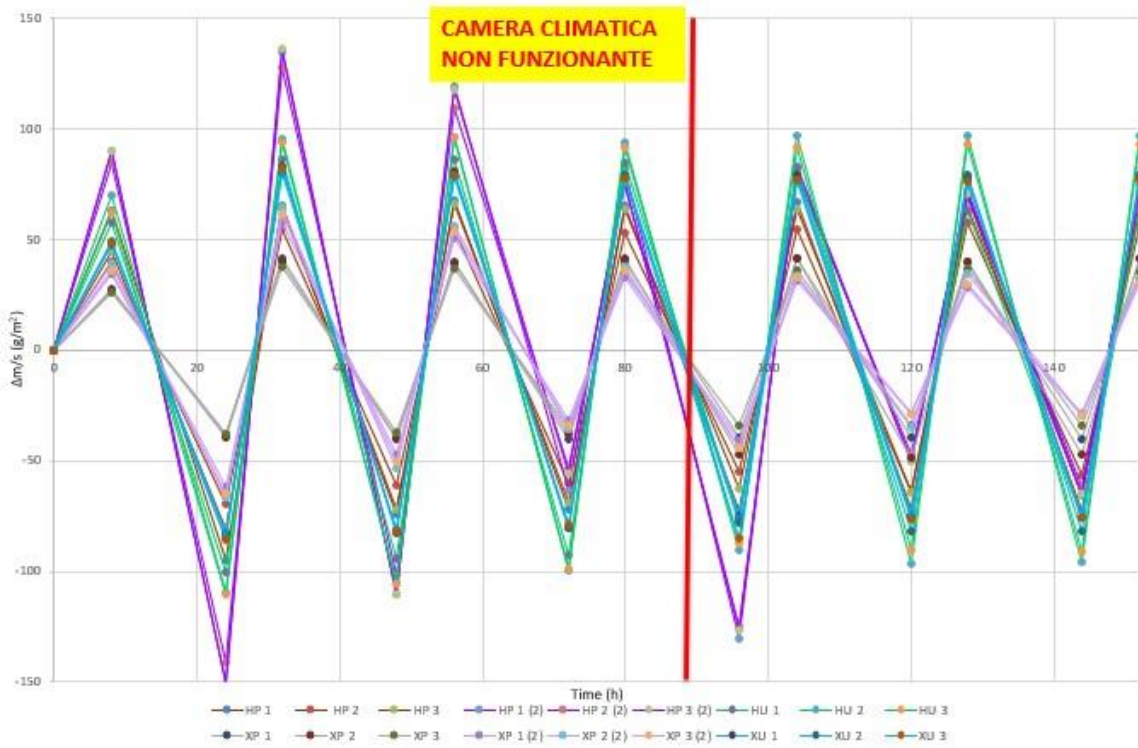


Grafico 28: Cicli di vapore acqueo assorbito e rilasciato dai singoli campioni

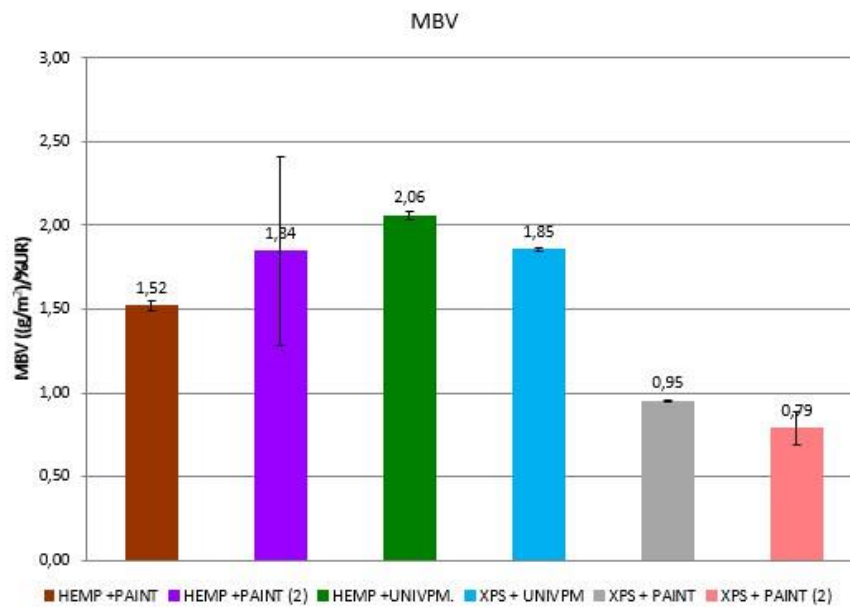


Grafico 29: Media per ogni tipo di campione nei cicli di variazione di U.R.

CONCLUSIONI

La sperimentazione condotta ha avuto l'obiettivo di confrontare il comportamento di differenti campioni, tra cui pannelli di XPS e canapa, rivestiti con malte commerciali e con la finitura innovativa sviluppata dall'UNIVPM. Questo confronto è stato fatto anche tramite l'utilizzo di due differenti pitture commerciali per la stessa applicazione. In questa tesi vengono messi in evidenza aspetti cruciali per la valutazione delle loro prestazioni in ambito edilizio. I risultati si concentrano su caratteristiche fondamentali quali le proprietà termo-igrometriche, disinquinanti e la permeabilità al vapore d'acqua, sottolineando l'importanza di soluzioni costruttive sostenibili e performanti.

I campioni testati erano:

- CANAPA + PAINT Keradecor White Plus.
- CANAPA + PAINT Iris Color.
- CANAPA + UNIVPM.
- XPS + PAINT Keradecor White Plus.
- XPS + PAINT Iris Color.
- XPS + UNIVPM.

Questo studio ha fornito risultati rilevanti in diversi ambiti, dimostrando che i pannelli in canapa possono rappresentare una valida alternativa ai pannelli sintetici tradizionali, come l'XPS, offrendo vantaggi sia in termini di sostenibilità ambientale che di prestazioni tecniche.

Le principali conclusioni hanno come tema principale:

- **Sostenibilità ambientale:** i pannelli in canapa hanno un impatto ambientale notevolmente inferiore rispetto ai pannelli commerciali come l'XPS. La coltivazione della canapa richiede minori risorse naturali e, grazie alla sua capacità di assorbire grandi quantità di CO₂ durante la crescita, contribuisce in modo significativo alla riduzione delle emissioni di gas serra. Questo rende la canapa un materiale ideale per costruzioni che vogliono ridurre il loro impatto ambientale, inserendosi in un contesto di edilizia sostenibile. Inoltre, la lavorazione della canapa richiede meno energia rispetto alla produzione dei pannelli in materiali sintetici, migliorando ulteriormente il bilancio ambientale.
- **Proprietà isolanti:** i risultati ottenuti durante le prove hanno evidenziato che i pannelli in canapa, soprattutto quelli trattati con la finitura UNIVPM, possiedono ottime proprietà isolanti, sia termiche che igroscopiche. La capacità dei pannelli in canapa di tamponare l'umidità, regolando il microclima interno, è stata notevolmente superiore rispetto ai pannelli in XPS.

Questo li rende particolarmente adatti all'uso in edifici residenziali e commerciali, poiché contribuiscono a mantenere condizioni ambientali stabili e a ridurre il consumo energetico. La combinazione con la finitura UNIVPM ha ulteriormente potenziato queste proprietà, offrendo un isolamento termico efficace senza compromettere la traspirabilità, un aspetto cruciale per prevenire problemi di umidità e condensa all'interno degli edifici.

- **Durabilità e resistenza:** sebbene i pannelli in XPS possano offrire una maggiore resistenza meccanica in alcuni contesti, i pannelli in canapa si sono dimostrati sufficientemente robusti per la maggior parte degli utilizzi pratici. In particolare, la combinazione con la finitura UNIVPM ha migliorato la resistenza dei pannelli in canapa, rendendoli adatti per un'ampia gamma di applicazioni. Con adeguati trattamenti, la durabilità dei pannelli in canapa può essere ulteriormente potenziata, rendendoli competitivi anche in contesti dove lo stress meccanico è elevato. Le prove hanno dimostrato che i pannelli in canapa sono in grado di sostenere sollecitazioni adeguate ad applicazioni edilizie.
- **Salute e sicurezza:** un altro aspetto rilevante emerso dalla sperimentazione riguarda la salute e sicurezza. I pannelli in canapa risultano essere più sicuri per l'uomo, in quanto non contengono sostanze chimiche tossiche comunemente presenti nei materiali sintetici. Inoltre, questi pannelli sono meno inclini a rilasciare composti organici volatili (VOC), che possono avere effetti nocivi sulla salute umana e compromettere la qualità dell'aria interna negli edifici. Questa caratteristica rende i pannelli in canapa una scelta ideale per ambienti residenziali e spazi chiusi, dove la qualità dell'aria e la sicurezza sono prioritarie. L'uso di finiture sostenibili, come quella sviluppata dall'UNIVPM, contribuisce ulteriormente a garantire ambienti salubri e sicuri.

Analizzando le considerazioni finali e le prospettive future possiamo dire che la sperimentazione ha dimostrato che i pannelli in canapa, in combinazione con finiture innovative come la UNIVPM, rappresentano una soluzione promettente e sostenibile per il settore delle costruzioni. I risultati ottenuti indicano che i pannelli in canapa offrono eccellenti proprietà isolanti e una buona traspirabilità, contribuendo a migliorare la qualità dell'aria interna e il comfort abitativo. La loro capacità disinquinante, testata anche nella riduzione dei livelli di NO_x, li rende particolarmente interessanti per l'utilizzo in contesti urbani, dove la riduzione dell'inquinamento atmosferico è cruciale.

I pannelli in canapa, grazie al loro minore impatto ambientale, alle loro proprietà isolanti e alla loro sicurezza per la salute umana, offrono un'alternativa competitiva ai materiali sintetici tradizionali come l'XPS. Con ulteriori investimenti in ricerca e sviluppo, è possibile migliorare ulteriormente le loro prestazioni, rendendoli una scelta predominante nel futuro dell'edilizia sostenibile. La

combinazione di materiali naturali, come la canapa, con finiture ad alte prestazioni, come la UNIVPM, potrebbe guidare l'evoluzione verso una costruzione più ecologica, efficiente e rispettosa dell'ambiente.

In conclusione, lo studio conferma che i pannelli in canapa rappresentano una soluzione innovativa e sostenibile per l'industria delle costruzioni, con potenzialità di crescita significative, soprattutto in un contesto in cui l'efficienza energetica e la riduzione delle emissioni di CO₂ sono diventate obiettivi prioritari. Il passo successivo sarà approfondire le potenzialità di questi materiali, esplorando ulteriori applicazioni e miglioramenti per renderli sempre più competitivi rispetto ai materiali sintetici tradizionali, contribuendo così a un futuro più verde e sostenibile.

BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

1. Sito del progetto multiclimact <https://multiclimact.eu/>
2. Sito del progetto multiclimact <https://www.cmcc.it/it/projects/multiclimact-multi-faceted-climate-adaptation-actions-per-migliorare-la-resilienza-la-preparazione-e-la-capacita-di-risposta-dellambiente-costruito-a-fronte-di-molteplici-pericoli-su-piu-scale>
3. Sito Edilcanapa S.r.l. <https://www.edilcanapasrl.it/azienda/>
4. Proprietà pannello in canapa <https://www.edilcanapasrl.it/prodotto/canapanel/>
5. Scheda tecnica per pannello in canapa <https://www.edilcanapasrl.it/wp-content/uploads/2023/11/canapanel-100-2023-60-x110-con-DOP-Rev-1.pdf>
6. Scheda tecnica pannello in XPS <https://www.thermal-engineering.org/what-is-extruded-polystyrene-xps-definition/>
7. Collepari, Collepari, Troli, *Il nuovo calcestruzzo*, Ponzano Veneto, Tintoretto, 2009 (quinta edizione)
8. Scheda tecnica Mapetherm https://cdnmedia.mapei.com/docs/librariesprovider47/products-documents/1_477-mapethermar1gg-it_956fc08c9652434f986bef3ee4c747bb.pdf?sfvrsn=e34d2092_0
9. Scheda tecnica Rasobuild https://products.kerakoll.com/yep-repository/kerakoll/media/Rbuild_e_extrafino_ITA_2024.pdf
10. Scheda tecnica CanapaMix3 <https://www.edilcanapasrl.it/wp-content/uploads/2023/07/canapamix3-2023.pdf>
11. Scheda tecnica calce idraulica https://www.heidelbergmaterials.it/sites/default/files/assets/document/6c/8c/scheda_tecnica_-_i.pro_calix_blanca_nhl_35.pdf
12. Gel di silice: struttura, proprietà e usi <https://chimicamo.org/chimica-generale/gel-di-silice/>
13. Scheda tecnica cellulosa <https://www.kimachemical.com/it/news/what-is-cellulose-ether>

14. Scheda tecnica Metolat P 872
https://www.munzing.com/static/721d050a1ec2e38824665f4882bc238f/td_METOLAT_P_872_EN_5b026c6688.pdf
15. Scheda tecnica biossido di titanio
https://products.evonik.com/assets/or/ld/AEROXIDE_TiO2_P_25_TDS_IT_IT_TDS_PV_520_43891_it_IT_WORLD.pdf
16. Scheda tecnica canaprimmer <https://edilcanapasrl.it/canaprimmer-fissativo-traspirante-e-idrorepellente-per-interni-ed-esterni/>
17. Scheda tecnica fissativo <https://www.leroymerlin.it/prodotti/vernici/preparazione-del-fondo-e-stucchi/fondi-e-fissativi/fissativo-per-pittura-su-legno-e-intonaco-di-calce-cementizia-e-cartongesso-isolante-base-acqua-1-l-36101233.html>
18. Scheda tecnica Keradecor White Plus https://products.kerakoll.com/yep-repository/kerakoll/media/Kdec_white_plus_ITA_2024.pdf
19. Scheda tecnica pittura Iris Color https://www.leroymerlin.it/prodotti/vernici/pitture-per-interni/pittura-bianca/pittura-bianca-per-interni-14-lt/pittura-per-interni-traspirante-iris-color-bianco-opaco-14-l-81990256.html?at_medium=Sea-Paid&at_source=Google&at_section=Vernici&at_campaign=LM_Cr.Vernici_Sea-Paid_Google_Pmax_Conversion_AO_Conversion&gad_source=1&gclid=Cj0KCCQjwjNS3BhChARIsAOxBM6qHxQW8PbbH8Ex5fNLYIhUMtW6GhY9iSDp8Yg8D0yd_HJTpidMxpmUaAn7vEALw_wcB
20. Scheda tecnica resina bicomponente https://www.aterrium.it/wp-content/uploads/2023/02/Scheda_tecnica_Elan-tech_MC256W256.pdf
21. Scheda tecnica rinforzo V50 Kerakoll <https://products.kerakoll.com/it-IT/p/rinforzo-v-50>
22. UNI EN 1015-12 2002 Normativa per la prova di Pull-off/Aderenza
23. Prova di conducibilità termica <https://analyzing-testing.netzsch.com/en/products/thermal-conductivity/hfm-446-lambda-eco-line-1>
24. Qaisar Maqbool, Natalia Czerwinska, Chiara Giosue, Simona Sabbatini, Maria Letizia Ruello, e Francesca Tittarelli. "New waste-derived TiO2 nanoparticles as a potential photocatalytic

additive for lime based indoor finishings.", Università Politecnica delle Marche, Department of 'Materials, Environmental Sciences and Urban Planning (SIMAU), *Journal of Cleaner Production* 373 (2022): 133853. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133853>.

25. UNI EN 1015-19:2000 Normativa per la permeabilità al vapore
26. Rode, Carsten; Peuhkuri, Ruut Hannele; Mortensen, Lone Hedegaard; Hansen, Kurt Kielsgaard; Time, Berit; Gustavsen, Arild; Ojanen, Tuomo; Ahonen, Jarkko; Svennberg, Kaisa; Arfvidsson, Jesper. "*Moisture Buffering of Building Materials*", Technical University of Denmark, Department of Civil Engineering. BYG Report No. R-127, 2005, pre-print version.