



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Edile

Studio di malte multifunzionali per applicazioni interne ad elevate proprietà di assorbimento di umidità e disinquinanti

Study of multifunctional mortars for internal applications with high moisture buffering and depolluting properties

Relatore:

Prof.ssa Francesca Stazi

Candidato:

Beatrice Bengasi

Correlatori:

Prof.ssa Chiara Giosuè

Prof. Costanzo Di Perna

A.A. 2021-2022

Indice

Indice	3
Abstract	5
1. Definizione del problema e stato dell'arte	7
2. Obiettivo	30
3. Materiali.....	31
3.1. Materiali MAMMUT	31
3.2. Materiali DIASEN	44
3.3. Preparazione miscele.....	45
3.4. Caratterizzazione delle malte	47
4. Metodi di prova in laboratorio.....	66
5. Metodi di monitoraggio in sito	78
5.1. Test room	78
5.2. Strumentazione	84
6. Risultati	91
6.1. Proprietà dis inquinante senza fotocatalisi.....	93



6.2. Inerzia interna con accensione delle lampade	101
6.3. Capacità di ridurre umidità	105
6.4. Effetti combinati	108
7. Osservazioni finali del monitoraggio in sito	120
8. Discussione.....	121
9. Conclusioni e ricerche future	125
10. Bibliografia e sitografia	127
11. Allegati.....	131

Abstract

In questa epoca di continui cambiamenti climatici, il tema della sostenibilità è diventato caro a tutti i settori, in particolare a quello edile. Il mondo delle costruzioni, infatti, è un importante consumatore di energia che, da solo, genera fino a 1/3 delle emissioni globali annuali di gas serra (GHG), contribuendo fino al 40% dell'energia globale e consumando il 25% dell'acqua globale in tutto il mondo (1). L'edilizia moderna, per questo motivo, è indirizzata verso la progettazione di costruzioni che realizzino al meglio le condizioni di comfort per gli occupanti ma attraverso soluzioni costruttive altamente efficienti dal punto di vista energetico. Molte leggi e normative europee, fissando parametri e limiti di progettazione molto stringenti, stanno diventando più severe in termini di efficienza energetica. Il miglioramento degli edifici da questo punto di vista, oltre che attraverso l'inserimento di impianti di riscaldamento-raffrescamento e di purificazione dell'aria adeguati, viene realizzato sfruttando l'inerzia termica delle costruzioni. Progettando opportune stratigrafie di pareti e coperture, infatti, è possibile abbassare i valori di trasmittanza termica e conservare i guadagni termigrometrici ottenuti all'interno. Si ritiene quindi che gli investimenti per la realizzazione di impianti termici debbano essere sempre preceduti da una corretta progettazione dell'involucro dell'edificio, capace di ridurre le perdite di calore verso l'esterno. Tuttavia, edifici a tenuta d'aria e fortemente isolati possono influenzare negativamente la salute e il benessere degli occupanti, a causa del ridotto scambio di aria e umidità. Ne consegue un peggioramento della qualità dell'aria interna (IAQ, indoor air quality) legato alla riduzione della ventilazione negli edifici, la quale favorisce l'aumento di concentrazione di inquinanti e di umidità all'interno. Vari studi hanno mostrato che livelli troppo alti o troppo bassi di umidità relativa (UR) aumentano i rischi di esposizione a batteri, virus e spore di muffe, oltre a ridurre la percezione e la soddisfazione delle persone degli ambienti interni. Inoltre, edifici più sigillati e caratterizzati dall'utilizzo di materiali da costruzioni e finiture tradizionali favoriscono



l'aumento della concentrazione di inquinanti come composti organici volatili (VOC) provenienti dai prodotti per la pulizia, dagli arredi, dai cosmetici, dai deodoranti, dagli insetticidi, dai dispositivi di riscaldamento, da colle, vernici e dagli occupanti stessi. Gli esseri umani che trascorrono gran parte del loro tempo all'interno degli edifici hanno necessità di vivere in ambienti più confortevoli e salubri possibili, per questo motivo il mondo delle costruzioni e della scienza dei materiali per l'edilizia, sono sempre più indirizzati verso soluzioni di rimozione passiva che possano mitigare al meglio questi due fattori di stress per il comfort indoor rimanendo sempre nei parametri di un approccio sostenibile.

1. Definizione del problema e stato dell'arte

Involucro edilizio

Nella storia del Pianeta i cambiamenti climatici dovuti a cause naturali si sono sempre manifestati ma il riscaldamento climatico a cui assistiamo da circa 150 anni è anomalo perché innescato dall'uomo e dalle sue attività. Si tratta di effetto serra antropico che stravolge e si aggiunge all'effetto serra naturale, rompendone gli equilibri che hanno garantito e garantiscono la formazione e la continuità della vita sulla Terra. Per questo il problema del surriscaldamento globale è diventato di interesse mondiale poiché sta sconvolgendo le economie nazionali, con costi alti per persone, comunità e paesi che saranno ancora più ingenti domani. Le persone stanno sperimentando gli impatti significativi del cambiamento climatico, quali ad esempio il mutamento delle condizioni ambientali, l'innalzamento del livello del mare e altri fenomeni meteorologici ancora più estremi.

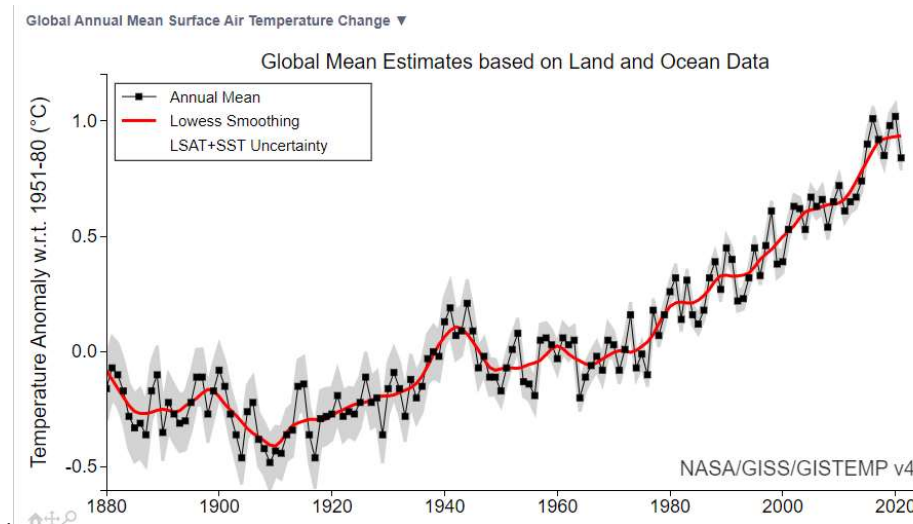


Figura 1- Indice di temperatura terra-oceano, dal 1880 ad oggi, con periodo base 1951-1980. La linea nera continua è la media annua globale e la linea rossa continua è il minimo quinquennale uniforme.

L'ombreggiatura grigia rappresenta l'incertezza annuale totale (LSAT e SST) con un intervallo di confidenza del 95% ed è disponibile per il download. [Ulteriori informazioni sul modello di incertezza aggiornato possono essere trovate qui: [Lenssen et al. \(2019\)](#)].

Questi sono le conseguenze dell'innalzamento della temperatura globale causato dall'incremento dell'effetto serra, di per sé naturale e fondamentale per la vita sulla terra. L'ispessimento dello strato di gas serra si è avuto con lo smisurato aumento delle emissioni provenienti dalla crescente industrializzazione dei Paesi. Secondo alcuni studi, come riferisce l'Organizzazione meteorologica mondiale (2019), la concentrazione di gas serra (GHG) è aumentata drammaticamente del 43% negli ultimi tre decenni e continuerà a farlo finché non si metteranno in atto politiche e accorgimenti volti a limitare tali emissioni (2). Oltretutto l'anidride carbonica (CO₂), principale gas di scarto dell'attività dell'uomo e dell'industrializzazione, è responsabile del 65% della concentrazione totale di GHG. Secondo l'Organizzazione meteorologica mondiale, la concentrazione di CO₂ nell'atmosfera ha raggiunto il livello più alto negli ultimi 3-5 milioni di anni portando alle numerose conseguenze globali visibili agli occhi di tutti. La lotta al contenimento dell'emissione di gas serra viene affrontato come tematica importantissima in molti progetti internazionali, tra cui l'Agenda 2030 per lo Sviluppo Sostenibile, che è un programma d'azione per le persone, il pianeta e la prosperità, sottoscritto il 25 settembre 2015 dai governi dei 193 Paesi membri delle Nazioni Unite, e approvata dall'Assemblea Generale dell'ONU.



Figura 2 - logo 13° goal dell'Agenda 2030

L'Agenda è costituita da 17 Obiettivi per lo Sviluppo Sostenibile - Sustainable Development Goals, SDGs - inquadrati all'interno di un programma più vasto costituito da 169 target o traguardi, ad essi associati, da raggiungere in ambito ambientale, economico, sociale e istituzionale entro il 2030 (3). In particolare, il 13° goal dell'Agenda 2030 intitolato "Lotta contro il cambiamento climatico" include tra i suoi target anche l'edilizia green e la sua rotta verso la costruzione di edifici NZEB che consentono non solo di risparmiare energia, acqua e ridurre le emissioni di CO₂, ma anche di educare, creare posti di lavoro e migliorare la salute e il benessere degli occupanti. I progetti passivi e near-zero energy mirano a tassi di ventilazione ridotti, a un'implementazione limitata di sistemi HVAC negli edifici residenziali e ad una tecnologia costruttiva con elevata inerzia termica. In Italia in particolare per contenere i consumi energetici degli edifici sono state promosse agevolazioni fiscali (bonus) per sensibilizzare la popolazione alla sostituzione degli impianti di climatizzazione esistenti poco efficienti e alla realizzazione di isolamenti dell'involucro opaco degli edifici in misura maggiore del 25%. Questo concetto passivo degli edifici comporta un evidente guadagno in termini energetici: isolando l'involucro dell'edificio con materiali appropriati, riducendo le aperture e utilizzando vetri performanti, il calore può essere controllato e catturato all'interno della casa in inverno e rilasciato all'esterno in estate (4). Tra gli strumenti più efficaci per migliorare le prestazioni energetiche di un edificio rientra il cappotto termico (interno o esterno) che è un sistema di isolamento termico dell'involucro realizzato non come blocco unico ma mediante l'incollaggio e/o fissaggio meccanico di più parti: collante, materiale isolante termico sotto forma di pannello, tasselli per ancoraggio, intonaco di fondo, strato di rinforzo o armatura, intonaco di finitura e accessori. Esso permette di ottimizzare le prestazioni energetiche degli edifici, migliorando il comfort abitativo, garantendo ottima coibentazione termica, isolamento dal caldo e dal freddo, riducendo i consumi energetici e di conseguenza le bollette, sia per il riscaldamento invernale che per il

raffrescamento estivo, e assicurando una rivalutazione dell'immobile nel momento in cui passa da una classe energetica inferiore a una più alta. Il cappotto termico contribuisce, inoltre, a elevare il grado d'isolamento acustico dell'abitazione e risolve il problema dei ponti termici, ovvero i punti dell'involucro edilizio in cui si verifica una dispersione del calore o si formano condensa e muffe. Per questi motivi in tutto il mondo, in Italia specialmente, si è avuta una profonda sensibilizzazione che ha portato una grande diffusione di questa tecnica costruttiva. In base alle zone climatiche del paese, la normativa ha proposto limiti di trasmittanza da soddisfare attraverso interventi edilizi per poter ottenere incentivi fiscali dallo Stato.

Questo approccio al risparmio energetico, tuttavia, influisce direttamente o indirettamente sull'IAQ (Quality of Air Indoor). Edifici molto isolati infatti rendono l'ambiente meno incline a ricambi d'aria che invece sono fondamentali alla conservazione di equilibrio tra concentrazione di umidità e di inquinanti interni, come i composti organici volatili (VOC). L'ingegneria pertanto è indirizzata verso la ricerca di soluzioni che possano bilanciare ermeticità e circolazione d'aria, lavorando più su forme strutturali e materiali edilizi che su impianti termici. Infatti, per promuovere il risparmio energetico negli edifici, è importante sviluppare tecnologie di purificazione dell'aria a basso consumo energetico che non si basano su usi esclusivi di sistemi HVAC, ovvero impianti attivi di riscaldamento, ventilazione e condizionamento dell'aria comunque dispendiosi a livello energetico. Le nuove tecnologie fanno perno sull'applicazione dei PRM (materiale di rimozione passiva) che consente ai progettisti di edifici di utilizzare metodi a basso consumo energetico per rimuovere gli inquinanti gassosi dell'aria interna e migliorare la IAQ, senza dover collegare nessun apparecchio alla corrente elettrica.

Sick Building Syndrome (SBS)

Le persone trascorrono in media il 90% del loro tempo all'interno di edifici, sia essi siano luoghi residenziali, di formazione (scuole) o di impiego (uffici)(5). Diviene quindi importante che gli ambienti siano in grado di realizzare una condizione di benessere per l'occupante. La qualità dell'aria interna degli edifici non è solo fondamentale per la salute e il comfort delle persone, ma può anche influenzare in modo significativo la percezione dell'ambiente interno da parte degli occupanti. Vari studi dimostrano infatti che c'è relazione tra il grado di soddisfazione in merito alle condizioni di comfort e l'attività svolta. In numerosi edifici, nonostante la portata di ventilazione sia adeguata a purificare l'aria dagli inquinanti interni, ci sono elevate percentuali di persone che considerano la qualità dell'aria insoddisfacente. Ciò provoca una serie di disturbi quali sonnolenza, mal di testa, irritazione agli occhi e all'apparato respiratorio.

L'esigenza di questa ricerca di "benessere indoor" è incrementata soprattutto in seguito alla recente epidemia di COVID-19 che ha rinchiuso la popolazione all'interno delle proprie case le quali, oltre a rappresentare dimore familiari, sono diventate veri e propri luoghi di lavoro in cui mettere in atto la pratica dello smartworking. Così è tornato maggiormente in auge il concetto di *Sindrome dell'edificio malato* (Sick building syndrome - SBS) che indica un quadro sintomatologico ben definito, che si manifesta in un elevato numero di persone occupanti edifici moderni o recentemente rinnovati, dotati di impianti di ventilazione meccanica e di condizionamento d'aria globale (senza immissione di aria fresca dall'esterno) e adibiti a uffici, scuole, ospedali, case per anziani, abitazioni civili.

Le manifestazioni cliniche sono aspecifiche, insorgono dopo alcune ore di permanenza in un determinato edificio e si risolvono in genere rapidamente, nel corso di qualche ora o di qualche giorno (nel caso dei sintomi cutanei) dopo l'uscita dall'edificio. Sebbene i sintomi siano di modesta entità, i casi di SBS che si verificano in ambienti lavorativi possono avere un costo più elevato

di alcune malattie gravi e a prognosi peggiore, a causa del significativo calo della produttività.

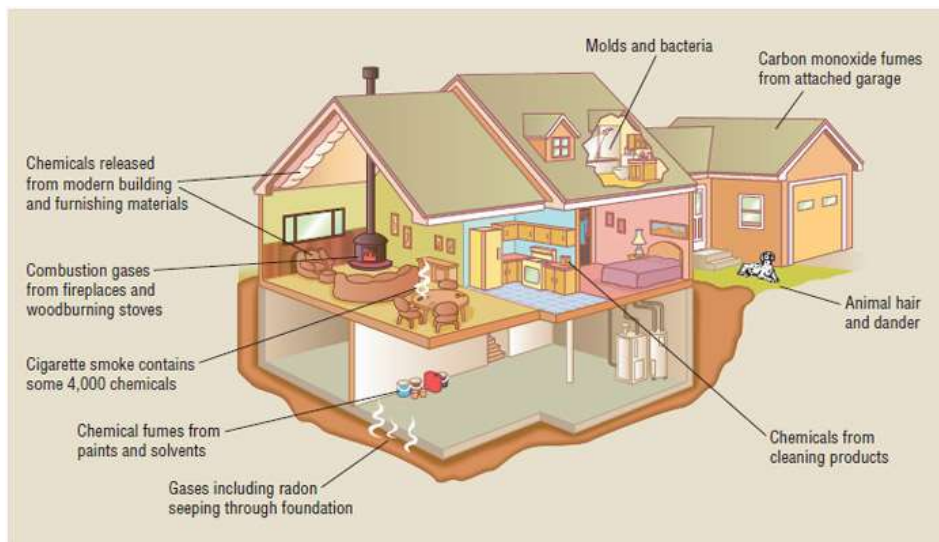


Figura 3- Sicking Building Syndrome

L'eziologia è ancora sconosciuta, probabilmente multifattoriale e variabile da caso a caso. Fattori legati agli edifici, ai sistemi di condizionamento e di ventilazione, ai programmi di manutenzione, al tipo e all'organizzazione del lavoro e fattori personali svolgono certamente un ruolo rilevante. Non a caso i motivi di insoddisfazione sono legati a valori troppo alti o troppo bassi di temperatura e/o umidità, tassi elevati di inquinanti aerodispersi, (odori sgradevoli, CO_2 , VOC, PM10...) e rumori. Da numerose indagini in edifici in cui sono stati segnalati problemi di salute o di comfort è emerso che il problema prevalente (in quasi la metà dei casi) era costituito da una ventilazione inadeguata. Molti composti chimici presenti nell'aria indoor sono noti o sospettati di causare irritazione o stimolazione dell'apparato sensoriale e possono dare vita a un senso di disagio e ad altri sintomi comunemente presenti nella cosiddetta SBS. Alcuni studi condotti su uffici e altri edifici ad uso pubblico in diversi paesi, hanno rivelato una frequenza di disturbi tra gli occupanti compresa tra il 15% e il 50%.(6)

In particolare, la prevalenza dei sintomi di SBS è stata riportata maggiormente tra le donne (74,4%) che negli uomini (68,5%). Le variabili indagate nei modelli di questi studi sono la soddisfazione sul lavoro, i parametri ergonomici, gli inquinanti microbiologici e la concentrazione di 1-metil-4-(1-metiletil)benzene.(7)

	Enforceable and/or Regulatory Levels			Non-enforced Guidelines and Reference Levels			
	NAAQS/EPA (Ref. B-4)	OSHA (Ref. B-5)	MAK (Ref. B-2)	Canadian (Ref. B-8)	WHO/Europe (Ref. B-11)	NIOSH (Ref. B-13)	ACGIH (Ref. B-1)
Carbon dioxide		5,000 ppm	5,000 ppm 10,000 ppm [1 hr]	3,500 ppm [L]		5,000 ppm 30,000 ppm [15 min]	5,000 ppm 30,000 ppm [15 min]
Carbon monoxide ^c	9 ppm ^g 35 ppm [1 hr] ^g	50 ppm	30 ppm 60 ppm [30 min]	11 ppm [8 hr] 25 ppm [1 hr]	90 ppm [15 min] 50 ppm [30 min] 25 ppm [1 hr] 10 ppm [8 hr]	35 ppm 200 ppm [C]	25 ppm
Formaldehyde ^b		0.75 ppm 2 ppm [15 min]	0.3 ppm 1 ppm ⁱ	0.1 ppm [L] 0.05 ppm [L] ^b	0.1 mg/m ³ (0.081 ppm) [30 min] ^p	0.016 ppm 0.1 ppm [15 min]	0.3 ppm [C]
Lead	1.5 µg/m ³ [3 months]	0.05 mg/m ³	0.1 mg/m ³ 1 mg/m ³ [30 min]	Minimize exposure	0.5 µg/m ³ [1 yr]	0.1 mg/m ³ [10 h]	0.05 mg/m ³
Nitrogen dioxide	0.05 ppm [1 yr]	5 ppm [C]	5 ppm 10 ppm [5 min]	0.05 ppm 0.25 ppm [1 hr]	0.1 ppm [1 hr] 0.004 ppm [1 yr]	1 ppm [15 min]	3 ppm 5 ppm [15 min]
Ozone	0.12 ppm [1 hr] ^g 0.08 ppm	0.1 ppm	j	0.12 ppm [1 hr]	0.064 ppm (120 µg/m ³) [8 hr]	0.1 ppm [C]	0.05 ppm ^k 0.08 ppm ^l 0.1 ppm ^m 0.2 ppm ⁿ
Particles ^e <2.5 µm MMAD ^d	15 µg/m ³ [1 yr] ^o 65 µg/m ³ [24 hr] ^o	5 mg/m ³	1.5 mg/m ³ for <4 µm	0.1 mg/m ³ [1 hr] 0.040 mg/m ³ [L]			3 mg/m ³
Particles ^e <10 µm MMAD ^d	50 µg/m ³ [1 yr] ^o 150 µg/m ³ [24 hr] ^o		4 mg/m ³				10 mg/m ³
Radon	See Table B-2 ^f				2.7 pCi/L [1yr]		
Sulfur dioxide	0.03 ppm [1 yr] 0.14 ppm [24 hr] ^g	5 ppm	0.5 ppm 1 ppm ⁱ	0.38 ppm [5 min] 0.019 ppm	0.048 ppm [24 h] 0.012 ppm [1 yr]	2 ppm 5 ppm [15 min]	2 ppm 5 ppm [15 min]
Total Particles ^e		15mg/m ³					

Tabella 1 - Confronto tra normative e linee guida relative con limiti di concentrazione relativa a ciascuna componente dell'inquinamento dell'aria interna.

In Italia già da molti anni sono riportati episodi significativi, ma non sono stati eseguiti studi epidemiologici su larga scala che abbiano interessato più edifici. Anche nell'esperienza italiana le alterazioni dei parametri ambientali, sebbene in alcuni casi significative, non sembrano da sole poter giustificare l'elevatissima prevalenza di una sintomatologia così complessa e strettamente correlata con la permanenza negli edifici studiati. Alcuni studi italiani hanno focalizzato l'attenzione sui costi, in termini puramente economici, di episodi di SBS, confermandone l'elevato impatto sociale. Infatti, la sindrome dell'edificio malato, a seconda dei livelli di incidenza, provoca assenteismo e ritardo dello svolgimento del lavoro da parte degli operatori insoddisfatti o che si ammalano. In Italia non c'è una normativa specifica a livello nazionale per il controllo della qualità dell'aria indoor negli edifici generici. Esistono in ogni

caso delle norme che vengono emanate dai Comuni, nell'ambito del Regolamento di Igiene e Sanità, e che fissano dei parametri di salubrità delle abitazioni e degli abitanti in genere. Queste norme seguono le indicazioni emanate dal Ministero della Sanità ed individuano, fra le varie cose, raccomandazioni obbligatorie relative alla ventilazione, alla presenza delle canne fumarie, alla volumetria degli alloggi e così via. Relativamente agli ambienti di lavoro, si seguono le indicazioni del D.L. del 9 aprile 2008, n 81 inerente alla tutela della salute e della sicurezza nei luoghi di lavoro. Per quanto riguarda l'inquinamento dell'aria in settori più delicati, come l'ambito sanitario, esistono diverse normative specifiche emanate sia in ambito nazionale che regionale.

L'Organizzazione mondiale della sanità (OMS) ha pubblicato le linee guida sulla qualità dell'aria interna per l'Europa, classificate in base ai valori di concentrazione di TVOC. Le diverse classi di qualità dell'aria e i relativi limiti di classe nella concentrazione di TVOC sono elencati nella tabella seguente.(8).

Level	Recommendation	TVOC [mg/m ³]	TVOC [ppm]
Outside quality classes	Greatly increased (not acceptable)	> 3.0	> 0.61
4	Significantly increased (only temporary exposure)	1.0 - 3.0	0.20 - 0.61
3	Slightly increased (harmless)	0.5 - 1.0	0.10 - 0.20
1	Target value	> 0.25	0 - 0.05

Tabella 2 - Linee guida sulla qualità dell'aria per l'Europa - Seconda edizione; hg. v. Organizzazione Mondiale della Sanità - OMS, Copenaghen (2000). Direttiva per la valutazione dell'aria interna, pubblicata dal gruppo di lavoro sull'aria interna del Ministero

Umidità

Nell'aria è sempre presente vapore acqueo in misura variabile. Ad ogni temperatura dell'aria nell'ambiente interno è associata una quantità massima di vapore che può essere contenuta nell'aria stessa; questa quantità è tanto più grande quanto più la temperatura è alta. La temperatura alla quale si

raggiunge il valore di UR 100% rappresenta la temperatura limite definita come temperatura di condensazione (o di rugiada). Con un ulteriore abbassamento della temperatura inferiore alla temperatura di rugiada l'aria perde vapore sottoforma di condensa. Nei componenti edilizi come nel caso delle pareti, il fenomeno della condensa, che può essere interstiziale o superficiale, rappresenta una problematica fondamentale da evitare dal momento che oltre ad alterare il comfort indoor deturpa i materiali delle tamponature, può infastidire il funzionamento di sistemi elettrici e se si manifesta per tempi superiori a 15 giorni, può essere seguito da insorgenza di muffa. Le cause di aumento dell'umidità relativa dipendono da diversi parametri, come le condizioni igrotermiche esterne, l'occupazione (es. periodo, numero di persone, tipo di attività), il tasso di ventilazione, le soluzioni costruttive specifiche, la penetrazione della pioggia, la risalita o l'umidità incorporata.

Con riferimento a queste problematiche si evince che è necessario evitare il rischio di condensazione e per questo sono attuabili due possibili strategie:

- aumentare la temperatura dell'ambiente e/o delle superfici che lo delimitano, incrementando l'isolamento termico dell'involucro o fornendo calore attraverso sistemi di riscaldamento;
- asportare vapore dall'aria tramite la ventilazione naturale o meccanica dell'ambiente o mediante deumidificatori.

In questo modo è possibile regolare le percentuali di umidità relativa all'interno del range di valori che caratterizzano il comfort indoor. I livelli di umidità dell'ambiente interno hanno un'influenza importante sulla salute e sul benessere degli occupanti: l'umidità relativa (RH) negli edifici influenza il comfort termico e la percezione della qualità dell'aria interna e, quando è troppo bassa o troppo alta, aumenta il rischio di sviluppare allergie e altre malattie. L'umidità relativa (RH) dell'ambiente interno infatti influenza la sensazione termica e il comfort, il benessere e la salute degli occupanti, dall'irritazione o secchezza delle mucose all'asma, problemi vocali e malattie

respiratorie croniche. Una revisione degli effetti sulla salute dell'umidità relativa negli ambienti interni suggerisce che essa influenza l'incidenza di infezioni respiratorie e allergie. Studi sperimentali su batteri e virus infettivi trasmessi per via aerea hanno dimostrato che la sopravvivenza o l'infettività di questi organismi è ridotta al minimo dall'esposizione a un'umidità relativa compresa tra il 40% e il 70%. L'incidenza di assenteismo o infezioni respiratorie è risultata inferiore tra le persone che lavorano o vivono in ambienti con umidità relativa media rispetto a bassa o alta. La dimensione interna delle popolazioni di acari e funghi allergenici dipende direttamente dall'umidità relativa, infatti, le popolazioni di acari sono ridotte al minimo quando l'umidità relativa è inferiore al 50% e raggiungono una dimensione massima all'80% di umidità relativa mentre la maggior parte delle specie di funghi non può crescere a meno che l'umidità relativa non superi il 60%. L'umidità relativa influisce anche sulla velocità di degassificazione della formaldeide dai materiali da costruzione interni, sulla velocità di formazione di acidi e sali da zolfo e biossido di azoto e sulla velocità di formazione di ozono. L'influenza dell'umidità relativa sull'abbondanza di allergeni, agenti patogeni e sostanze chimiche nocive suggerisce che i livelli di umidità relativa interna dovrebbero essere considerati un fattore della qualità dell'aria interna. La maggior parte degli effetti negativi sulla salute causati dall'umidità relativa sarebbe ridotta al minimo se l'umidità relativa fosse compresa nel range tra il 40% e il 60% (9). Ciò richiederebbe l'umidificazione durante l'inverno nelle zone con climi invernali freddi.

I sistemi di condizionamento dell'aria mirano a mantenere livelli di umidità relativa ottimali, ma consumano energia e il loro funzionamento efficace dipende dalla comprensione da parte degli utenti della corretta messa in servizio del sistema e dalla regolare manutenzione. Inoltre, devono essere presi in considerazione la produzione di rumore e i costi di tali apparecchi. Una soluzione alternativa è regolare passivamente l'UR interna e utilizzare la capacità naturale dei materiali igroscopici, come intonaci di argilla e gesso, di

immagazzinare e rilasciare vapore acqueo, riducendo gli alti e bassi estremi di UR nell'ambiente interno. L'uso di materiali sensibili al vapore come l'intonaco argilloso riduce i picchi di umidità relativa interna grazie alla loro buona capacità tampone dell'umidità. Le costruzioni a parete hanno la capacità di contribuire alla regolazione passiva dell'umidità relativa interna. Questa proprietà, denominata assorbimento dell'umidità, è legata all'igroscopicità dei materiali, che consente ai materiali di immagazzinare e rilasciare umidità da e verso l'aria circostante, a seconda del gradiente di umidità relativa interna migliorando passivamente la qualità dell'aria interna e riducendo il consumo energetico operativo di qualsiasi sistema di condizionamento.

VOC

Negli ultimi decenni, l'inquinamento dell'aria interna ha ricevuto notevole attenzione a causa del suo impatto sulla salute, sul comfort e sulla produttività degli occupanti degli edifici. Per "inquinamento indoor" (indoor pollution) si intende la modificazione della normale composizione o stato fisico dell'aria atmosferica interna, dovuta alla presenza nella stessa di contaminanti chimici (organici e inorganici), fisici (radiazioni) e biologici (muffe, acari, microrganismi) in quantità e con caratteristiche tali da alterare le normali condizioni ambientali e di salubrità dell'aria stessa e tali da costituire un pericolo diretto o indiretto per la salute dell'uomo. (10)

A differenza dell'inquinamento dell'aria atmosferica esterna (outdoor pollution), oggetto di grande attenzione già da molti anni e di cui sono state presto identificate cause (traffico automobilistico, impianti industriali, impianti di riscaldamento domestico), effetti sulla salute (aumento dell'incidenza di malattie polmonari, cardiache e neoplastiche) e misure di prevenzione, solo negli anni più recenti è emersa l'esigenza di approfondire le conoscenze sull'inquinamento indoor. Questa sensibilizzazione si è avuta soprattutto in seguito alla recente epidemia di COVID-19 che ha costretto la popolazione

mondiale a trascorrere mesi chiusa in casa in seguito all'aumento di evidenze scientifiche allarmanti sugli effetti sanitari legati a questo fenomeno.

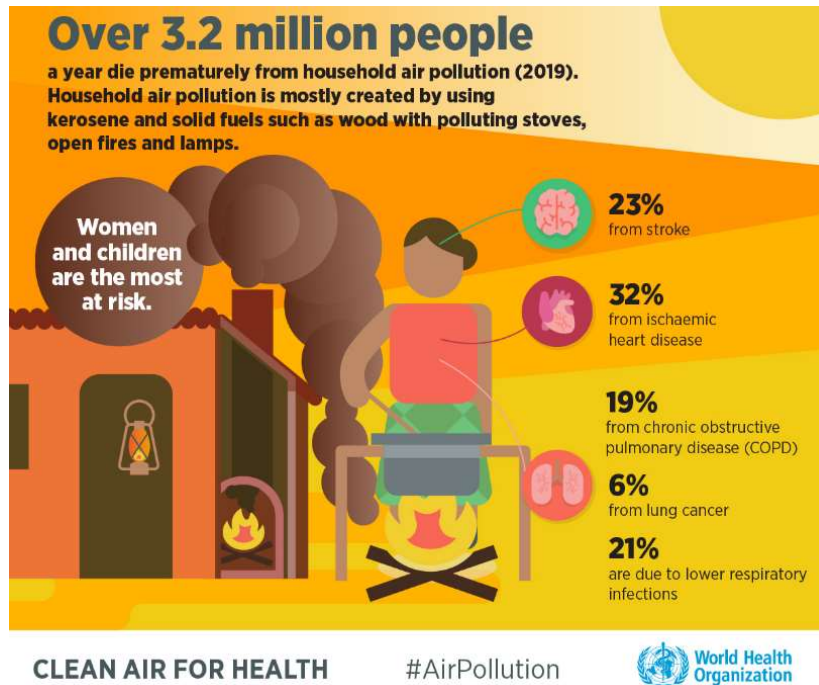


Figura 4 - Rischi dovuti all'inquinamento dell'aria negli ambienti domestici

La verità è che l'aria all'interno delle case, degli uffici e di altri edifici può essere dalle 5 alle 50 volte più inquinata rispetto a quella esterna. Questo accade perché le normali attività umane indoor (cottura dei cibi, pulizie con agenti chimici, ecc) e le sostanze presenti in tutti gli elementi d'arredo, si sommano agli inquinanti esterni che vengono intrappolati e si accumulano nelle mura delle abitazioni o dei luoghi di lavoro.

Tra gli inquinanti chimici particolare interesse rivestono i Composti Organici Volatili (VOC) i quali, a loro volta, sono classificati secondo la World Health Organization (WHO) in quattro principali categorie in base alle temperature di ebollizione:

- composti organici molto volatili (VVOC) con $T < (50 \div 100 \text{ } ^\circ\text{C})$;
- composti organici volatili (VOC) con $(50 \div 100 \text{ } ^\circ\text{C}) < T < (240 \div 260 \text{ } ^\circ\text{C})$;
- composti organici semi-volatili (SVOC) con $(240 \div 260 \text{ } ^\circ\text{C}) < T < (380 \div 400 \text{ } ^\circ\text{C})$;
- composti organici associati a materiale particolato (POM).

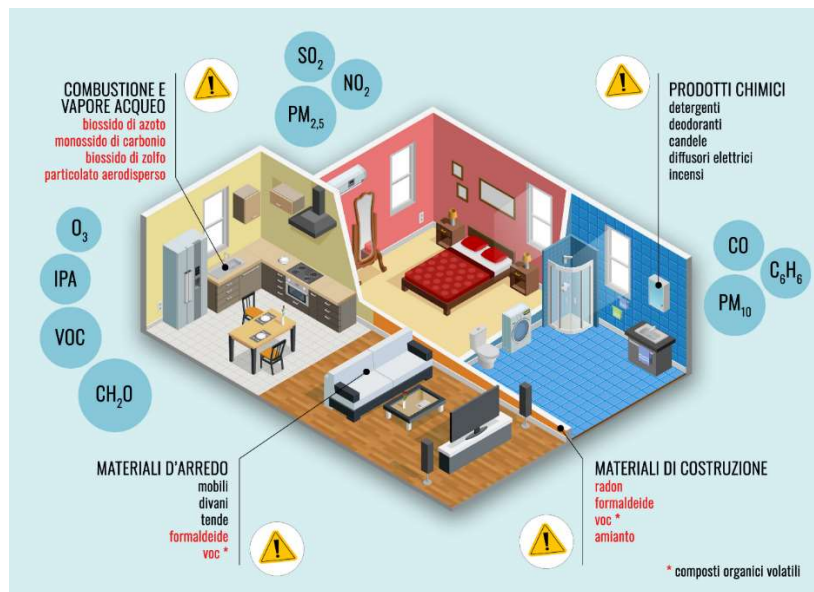


Figura 5- Fattori di inquinamento indoor

Tra questi si è visto come i VOC, il cui punto di ebollizione è compreso tra (50 °C e 100 °C) e (240 °C e 260 °C) ambienti, siano costantemente presenti negli ambienti interni ed a concentrazioni più alte rispetto all'esterno in quanto sono dati da solventi presenti in vernici e rivestimenti, benzene presente nel fumo di tabacco, cloruro di metilene presente in vernici spray e adesivi, formaldeide che viene rilasciata lentamente da molti materiali da costruzione, vernici, piastrelle sintetiche. Pertanto, negli uffici, nelle case, nuovi arredi, rivestimenti murali, e apparecchiature da ufficio come fotocopiatrici e ovviamente le combustioni delle stufe e fumo di tabacco possono liberare VOC.

Attualmente non ci sono valori limite, ma le legislazioni europea ed italiana mostrano un'attenzione crescente come dimostrato dalla Dir. 2004/42/CE recepita in Italia con il d.lgs. n. 161/2006, relativa alle emissioni di VOC da solventi organici presenti in pitture e vernici e in taluni prodotti per carrozzeria e recante modifica della direttiva 1999/13/CE. La direttiva è stata recepita in Italia con il d.lgs. n. 161 del 27/3/2006.

Le strategie convenzionali per ridurre gli inquinanti atmosferici interni possono essere classificate in diversi gruppi, tra cui il controllo della fonte, la diluizione mediante ventilazione e le tecnologie di rimozione ingegnerizzata.

Il controllo della fonte non è sempre possibile per tutti gli inquinanti derivanti dalle attività degli occupanti o dai materiali di arredamento/di finitura. La diluizione mediante ventilazione, d'altra parte, non è efficiente dal punto di vista energetico o possibile per le città affollate con un elevato inquinamento esterno (9). Pertanto, sono state proposte varie tecniche ingegneristiche per rimuovere gli inquinanti interni, tra cui assorbimento, filtrazione, ossidazione fotocatalitica (PCO) e plasma. Sebbene diversi studi abbiano dimostrato l'impatto positivo di questi metodi sulla qualità dell'aria interna (IAQ), sono stati segnalati anche alcuni inconvenienti. Ad esempio, la filtrazione e l'adsorbimento richiedono ulteriori fasi di smaltimento/rigenerazione per i filtri/adsorbenti saturi. La PCO e il plasma offrono generalmente tempi operativi a lungo termine grazie alla loro capacità di autorigenerazione, ma possono produrre sottoprodotti pericolosi tra cui formaldeide e ozono che necessitano di un processo di post-trattamento per catturare questi inquinanti secondari. Inoltre, l'applicazione di questi metodi attivi è associata ad un aumento del consumo di energia.

Per superare gli inconvenienti sopra menzionati, è stata proposta l'applicazione di materiali di rimozione passiva (PRM), come metodo passivo per la purificazione dell'aria interna, già noti nelle pagine precedenti per i problemi legati all'umidità. Questi materiali sono in grado di rimuovere/ridurre efficacemente gli inquinanti atmosferici interni con un consumo energetico nullo o molto basso e una formazione minima di sottoprodotti. L'efficacia delle PRM dipende dal tipo di inquinanti, dalle caratteristiche delle PRM, nonché da fattori ambientali e operativi. Diversi studi hanno riportato risultati promettenti per l'applicazione dei PRM. Tuttavia, la maggior parte di essi è stata condotta su scala pilota e in condizioni di laboratorio, che potrebbero non corrispondere ad applicazioni reali.

Letteratura internazionale

I materiali di rimozione passiva (PRM) hanno recentemente ottenuto un grande interesse per le loro capacità di rimuovere gli inquinanti interni senza ulteriore consumo di energia, per la conservazione dell'estetica nonostante le ampie superfici di applicazioni e per le minori quantità di formazione di sottoprodotti. In letteratura internazionale i PRM, in base al loro meccanismo, vengono classificati in due gruppi:

- materiali a base di ossidazione fotocatalitica (PCO)
- materiali a base di assorbimento.

A. MATERIALI A BASE DI OSSIDAZIONE FOTOCATALITICA

Questi materiali sfruttano il meccanismo di degradazione fotocatalitica degli inquinanti dell'aria interna e hanno guadagnato notevole attenzione poiché hanno il potenziale di trasformare gli inquinanti in prodotti finali innocui o meno dannosi come l'anidride carbonica e l'acqua. Tuttavia, la mineralizzazione incompleta di contaminanti complessi può produrre inquinanti secondari come sottoprodotti. Il biossido di titanio (TiO_2), che può presentarsi in natura sotto forme cristalline diverse (rutilo, anatasio o brookite), è uno dei fotocatalizzatori più utilizzati grazie alla sua stabilità chimico/fisica, all'economicità, all'ampia disponibilità e alla grande capacità di degradare una vasta gamma di VOC. Questo ossido di metallo è un semiconduttore comunemente attivato sotto irraggiamento di luce ultravioletta (UV).(11). Il semiconduttore è caratterizzato da una particolare struttura a bande, di valenza e di conduzione, che sono separate da una banda proibita, o band gap, in cui gli elettroni non possono trovarsi.

Quando il cristallo di semiconduttore viene irradiato con della luce a energia sufficientemente alta, cioè pari o superiore all'entità del band gap, un elettrone della banda di valenza può assorbire l'energia del fotone e passare alla banda di conduzione, lasciando una lacuna nella banda di valenza. Gli elettroni e le lacune così generate migrano poi alla superficie del cristallo,

dove reagiscono con le specie adsorbite: accettori o donatori di elettroni. I prodotti che si formano a seguito di questa reazione sono tipicamente dei radicali liberi, fortemente reattivi, che in genere vanno poi ad attaccare altri componenti del sistema, quali agenti inquinanti.

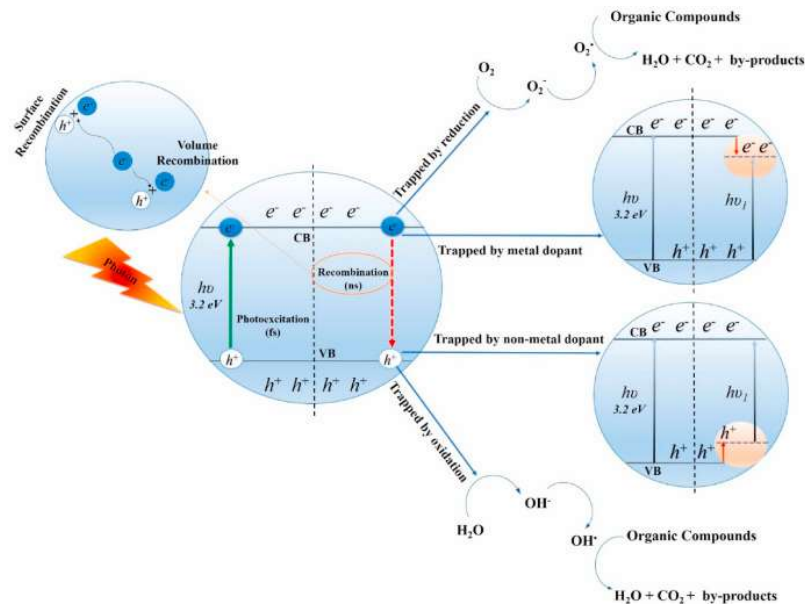


Figura 6- Il processo PCO e la modifica del fotocatalizzatore

Per migliorare le prestazioni del TiO_2 e la sua applicazione sotto irraggiamento di luce diurna (più pratica per ambienti interni) vengono proposte alcune tecniche di modifica. Questi includono il drogaggio di metalli/non metalli, il co-doping e l'eterogiunzione con altri semiconduttori per migliorare l'assorbimento della luce visibile. Inoltre, vengono proposte strategie come la modifica della superficie per ridurre l'idrofilia superficiale e aumentare la possibilità di adsorbimento di COV. Le prime tecniche restringono il TiO_2 band gap e spostano il bordo di assorbimento della luce nelle regioni visibili; in questo modo migliorano le caratteristiche della superficie per raggiungere una maggiore attività in condizioni di elevata umidità.

Al giorno d'oggi, i fotocatalizzatori modificati a base di TiO_2 sono utilizzati per la produzione di molti materiali da costruzione diversi come vernici, carta da parati, intonaco minerale, argilla, cemento e malte. Inoltre, la natura super-

idrofila del TiO_2 , come fotocatalizzatore, migliora la bagnabilità superficiale favorendo una evitabile saturazione e quindi una reversibilità del processo. Infatti, l'acqua aiuta il processo di lavaggio delle particelle nocive assorbite e quindi un ripristino della situazione iniziale, antecedente al fenomeno di assorbimento. I materiali contenenti TiO_2 hanno, quindi, una funzione autopulente che riduce i costi di manutenzione. Tra i materiali da costruzione utilizzati come PRM basati su PCO si prende ad esempio la malta, della quale diversi studi hanno evidenziato buone prestazioni per la rimozione degli inquinanti atmosferici interni.

L'incorporazione di un fotocatalizzatore TiO_2 nella malta può essere ottenuta in diversi modi che ne influenzano l'efficienza in base ai diversi impatti con i parametri ambientali:

- miscelando le particelle di TiO_2 durante la produzione della malta (come nella tesi in esame)
- verniciando direttamente una soluzione in sospensione di TiO_2 sulla superficie della matrice cementizia
- spruzzando un fotocatalizzatore TiO_2 sulla superficie dei materiali cementizi freschi

Diversi fattori influenzano le prestazioni della malta contenente TiO_2 : quantità di TiO_2 , dimensione delle particelle, metodo di preparazione e durata dell'irradiazione.

Uno studio presso l'università di Milano ha testato provini di 11 diverse malte con la stessa proporzione di miscela e contenenti due diverse forme di anatasio (polvere e sospensione) o con una loro combinazione. La malta testata dopo irradiazione di 6 e 23 ore, ha mostrato un'elevata attività fotocatalitica per la rimozione del 2-propanolo(12). Un buon compromesso tra proprietà fotoattivate e contenuto di anatasio è risultato essere il campione contenente il 3% di polvere di anatasio e il 2% di sospensione di anatasio; si è infatti notato che una miscela delle due diverse forme di anatasio portava ad effetti sinergici rispetto a malte a parità di contenuto di anatasio aggiunto solo

in polvere o in sospensione. Il suddetto campione ha permesso di ottenere sia una buona conversione nei test fotocatalitici sia una notevole variazione dell'interazione dell'acqua con la superficie, che diventava superidrofila dopo irraggiamento UV. Queste due proprietà hanno portato ad un pronunciato atteggiamento autopulente. Un altro studio del Politecnico di Milano fornisce risultati del tasso di degradazione della formaldeide in funzione del contenuto di TiO_2 aggiunto alla matrice cementizia dallo 0 al 10 % in peso. Nelle condizioni sperimentali, la velocità di degradazione aumenta proporzionalmente al contenuto di TiO_2 . Tuttavia, al di sopra del 5 % in peso di TiO_2 , il tasso di degradazione si stabilizza e raggiunge il plateau, come si può vedere nel grafico seguente. (14) Un altro aspetto che influenza l'azione del PCO è il tipo di aggregato costituente; le malte con aggregati non convenzionali come gel di silice rimuovono oltre l'80% dell'inquinante tracciante dopo 2 ore di test mentre le malte a base di zeolite rimuovono il 65% di esso dopo lo stesso tempo. Inoltre, il TiO_2 migliora le proprietà di disinquinamento come agente di ossidazione fotocatalitica quando la malta è vicina a saturazione(15). Le ricerche di (González-Sánchez et al. 2021) hanno dimostrato che la presenza di superfluidificante ha determinato un netto incremento dell'azione disinquinante delle malte di calce mediamente del 33% rispetto alle malte senza superfluidificante, raggiungendo un 44% di rimozione di NO. Inoltre, si migliora anche l'idrofilia fotoindotta delle malte, meccanismo che favorisce l'azione autopulente.(16). Senff et al. (2018) hanno testato diversi provini contenenti differenti percentuali di cellulosa per valutare l'influenza individuale e combinata dell'aggiunta di due distinte dimensioni di fibra: la degradazione di NO è stata influenzata positivamente dall'aggiunta di cellulosa. Le formulazioni con il 4 % in peso mostrano le migliori prestazioni ovvero un aumento di oltre il 50% della degradazione di NO dopo 60 minuti rispetto al campione di riferimento(17).L'efficacia del fotocatalizzatore è influenzata anche dall'aspetto cromatico della superficie. Non a caso, secondo uno studio effettuato presso l'Università Politecnica delle Marche, il

rendimento più basso, pari al 20%, si registra nelle malte confezionate con carbone attivo poiché il loro colore scuro può ridurre la riflettanza della radiazione e di conseguenza influenzare le proprietà fotocatalitiche del substrato(1). Si dimostra che contenuti di anatasio molto elevati portano indubbiamente ad un prodotto performante ma non possono essere presi in considerazione in quanto provocano un aumento eccessivo dei costi di produzione.

B. MATERIALI A BASE DI ASSORBIMENTO

I PRM a base di assorbimento, noti anche come materiali da costruzione assorbenti (SBM), sono in grado di catturare gli inquinanti atmosferici interni sulle loro superfici porose. In generale, in un processo di assorbimento si possono distinguere quattro possibili fasi:

- diffusione/avvezione in fase aerea di contaminanti sulla superficie dell'adsorbente;
- assorbimento di inquinanti sul materiale adsorbente;
- diffusione attraverso la superficie interna del materiale adsorbente;
- desorbimento di inquinanti iniziali e/o sottoprodotti dalla superficie del materiale adsorbente.

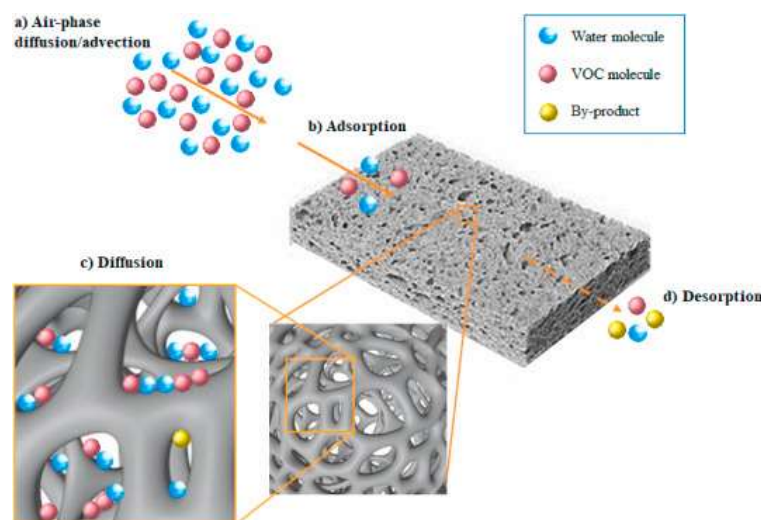


Figura 7 - Fenomeni di trasporto attraverso PRM a base di assorbimento: a) diffusione/advezione in fase aerea, b) adsorbimento, c) diffusione, ed) desorbimento

Il meccanismo di rimozione degli SBM dipende fortemente dalle caratteristiche sia dell'adsorbato che dell'adsorbente, tra cui idrofilia/idrofobicità, polarità, superficie, dimensione dei pori e capacità di assorbimento. L'uso di fibre di cellulosa ha aumentato i valori di MBV, essendo questo incremento principalmente dominato dalla concentrazione di fibre. La dimensione delle fibre influisce anche sul comportamento igrometrico dell'intonaco e il MBV più alto misurato è stato ottenuto per la formulazione del provino contenente il contenuto più alto, 4%, del secondo tipo di fibra (1.85 g/m %UR). La porosità influisce sempre sull'adsorbimento: Tittarelli et al. hanno studiato l'utilizzo di microriempitivi commerciali e di scarto a base di carbonio. Come riempitivi commerciali sono state utilizzate nanopiastrine di grafene (GNP) e carbone attivo in polvere (AC). Come rifiuti inestimabili sono stati scelti un char (CH) ottenuto dal processo di gassificazione delle biomasse e la frazione più fine di una sabbia di fonderia usata (FS). I riempitivi sono stati aggiunti allo 0,25, 0,50 e 1,00% sul peso della calce. Dai risultati, l'aggiunta di cariche carboniose, indipendentemente dalla loro natura e quantità, riduce la porosità totale e il raggio critico dei pori delle paste, ma questa riduzione di conseguenza rallenta l'assorbimento capillare d'acqua delle paste, sia a breve che a lungo tempo di contatto con l'acqua. In alcuni provini l'assorbimento capillare di acqua è diminuito di oltre il 50%. La capacità disinquinante delle paste, in termini di adsorbimento MEK (tracciante usato come esempio di inquinante VOC), migliora principalmente con l'aggiunta di carbone attivo all'1,00% in peso. Tuttavia, entrambe le cariche di scarto, in tutte le percentuali, mostrano un'ottima capacità di adsorbimento, pari anche al 50% quando si aggiunge sabbia di fonderia usata. Se da una parte le cariche carboniose migliora l'adsorbimento di acqua e VOC come SBM, esso non è efficace per produrre un'attività fotocatalitica alle paste quando è assente un agente fotocatalitico. Sotto irraggiamento UVA ed in presenza di TiO_2 , le cariche carboniose diminuiscono addirittura il comportamento fotocatalitico a causa dell'imbrunimento della pasta(19).

Le prestazioni dei PRM basati su assorbimento e le riemissioni di VOC dipendono anche dall'interazione tra materiali da costruzione e inquinanti, nonché dalle condizioni ambientali. In uno studio svolto presso l'università di Bath, gli studiosi hanno indagato la risposta di intonaci di argilla e gesso a funzioni di umidità e temperatura quasi sinusoidali e simultanee, è stato dimostrato sperimentalmente che l'umidità relativa influenza la quantità di vapore acqueo adsorbito e desorbito dai materiali, mentre la temperatura influisce sulla velocità e sul tempo di risposta dell'argilla e del gesso alla variazione di umidità interna. Inoltre, le caratteristiche di penetrazione come il tempo di penetrazione, la capacità di adsorbimento e il tempo di saturazione degli inquinanti gassosi sui materiali assorbenti dipendono dalle loro proprietà e dalle condizioni di adsorbimento.(18)

Lo stesso gruppo di ricercatori inglesi, in un'altra indagine ha dimostrato che c'è differenza tra test di laboratorio e simulazioni in larga scala: gli stessi materiali assorbenti installati all'interno di un edificio simulato registrano valori di tamponamento dell'umidità molto più bassi di quelli sperimentali(9). Ciò è dovuto al fatto che in laboratorio non vengono considerati l'effetto della ventilazione e la partecipazione degli altri componenti della parete alla mitigazione dell'umidità interna.

In letteratura, inoltre, si osserva che c'è sinergia tra effetto fotocatalitico e idrofilia. L'anatasio contenuto in alcune malte fornisce sia una buona conversione nei test fotocatalitici sia una notevole variazione dell'interazione dell'acqua con la superficie, che è diventata superidrofila dopo l'irradiazione UV. (12)

Per far avanzare l'uso pratico delle SBM, è essenziale valutarne la stabilità, a lungo termine, per ridurre la concentrazione di contaminanti all'interno. Le prestazioni dei PRM a base di assorbimento e delle riemissioni di COV dipendono anche dall'interazione tra materiali da costruzione e inquinanti, nonché dalle condizioni ambientali. Ad esempio Shayegan et al. hanno dimostrato che l'umidità influisce sulle prestazioni di assorbimento dei

materiali da costruzione ma sotto a livelli del 50% di umidità relativa questo effetto è trascurabile o meno influente.

Vale la pena notare che, in alcune PRM, può formarsi un complesso stabile tra il gruppo funzionale assorbente e la molecola VOC che ostacola il processo di desorbimento. Huang et al. ha riportato che la capacità di adsorbimento intrinseca degli adsorbenti è una delle caratteristiche più importanti di un materiale da costruzione, che è più importante della sua area superficiale, porosità e distribuzione delle dimensioni dei pori, polarità e gruppo funzionale.

Le prestazioni di rimozione dei PRM a base di adsorbimento si basano principalmente su due diversi meccanismi tra cui l'adsorbimento fisico, noto come fisioassorbimento, e l'adsorbimento chimico, noto come chemisorbimento(20). Il fisioassorbimento è principalmente causato da un debole Van der Waals e dalle forze elettrostatiche tra gli atomi di superficie dell'adsorbente e le molecole di adsorbato. Pertanto, in un processo di fisioassorbimento, nessuna composizione chimica di adsorbenti e adsorbati cambia. In questo processo, gli adsorbenti possono adsorbire adsorbati multistrato, determinando deboli interazioni tra gli strati superiori degli adsorbati e la superficie dell'adsorbente. Pertanto, la possibilità di riemissione di COV dall'adsorbente potrebbe essere notevole(21).

In un processo di chemisorbimento, d'altra parte, sono coinvolte forze di valenza in cui l'adsorbente e gli adsorbati condividono gli elettroni tra i loro atomi. Queste forze sono più forti rispetto alle forze di Van der Waals che si formano nel fisioassorbimento. Poiché nel chemisorbimento solo uno strato di adsorbati viene adsorbito sulla superficie degli adsorbenti, le interazioni irreversibili tra le coppie di adsorbimento causano una riemissione molto bassa di COV dalla superficie. Vari composti adsorbenti, tra cui carbone attivo (AC), allumina attivata, gel di silice, zeoliti e minerali argillosi porosi sono usati come agenti adsorbenti per migliorare le caratteristiche di adsorbimento delle

SBM (22). Di seguito vengono esaminati alcuni materiali da costruzione e di finitura utilizzati come PRM.

L'accoppiamento di materiale cementizio con agenti assorbenti come aggregati migliora l'efficienza di pulizia dell'aria interna dei materiali. Ad esempio, le zeoliti a basso costo vengono utilizzate per produrre aggregati leggeri che agiscono anche come agenti antibatterici (23). Krou et al. (24) hanno studiato l'effetto di adsorbimento di paste cementizie prodotte mescolate con una piccola frazione di polvere AC per la rimozione di toluene e acetaldeide. Hanno concluso che l'affinità tra l'acetaldeide (composti polari) con carbone attivo (idrofobo) non era significativa. Tuttavia, nel caso del toluene (non polare), è stata osservata una maggiore capacità di adsorbimento. In un altro studio di Horgnies et al. (25), il NO_2 la capacità di adsorbimento è stata migliorata introducendo una piccola quantità di carbone attivo nella miscela di calcestruzzo. Tittarelli et al. (23) ha studiato l'efficienza di rimozione del metiletilchetone (MEK) di cinque malte preparate in applicazioni per interni. Hanno valutato l'effetto di diversi leganti e vari aggregati sull'assorbimento dell'acqua e sulla morfologia delle malte. I risultati hanno mostrato un'efficienza di rimozione del MEK fino all'85% dopo 24 h con la malta di calce e zeolite.

2. Obiettivo

Lo scopo di questa sperimentazione è quella di testare in scala reale la capacità di rimozione passiva di una malta multifunzionale. Simulando in uno spazio confinato l'ambiente indoor di un edificio, verranno confrontate due tipologie di finiture, una commerciale e una innovativa. In particolare, tale confronto verrà effettuato tra una finitura commerciale prodotta dalla DIASEN e una prodotta dall'UNIVPM. La finitura prodotta dall'UNIVPM sarà a base di calce, bottom ash, fly ash, silica gel, TiO_2 e additivi. Il confronto verrà improntato sulla base di parametri microclimatici, quali temperatura e umidità relativa e quantità di microinquinanti aerodispersi. Lo scopo è quello di testare la malta leggera a base di calce a basso impatto ambientale con caratteristiche multifunzionali che riesca ad avere una efficace attività disinquinante all'interno di un ambiente confinato e a fungere da tampone igroscopico, migliorando la qualità dell'aria interna e il comfort in maniera passiva, attraverso l'utilizzo di aggregati non convenzionali, tra cui materiali di scarto, riducendo i costi ed il dispendio di energia senza perdere i requisiti tradizionali richiesti ad una malta. La finitura del brevetto a base di materiali adsorbenti leggeri attualmente non utilizzati nei conglomerati tradizionali accoppiati a un fotocatalizzatore, capace di degradare gli inquinanti adsorbiti, è già risultata efficace in scala di laboratorio.

In questa tesi si testeranno le proprietà termo-igrometriche e disinquinanti in un ambiente reale confrontandole con una di finitura tradizionale attualmente in commercio.

3. Materiali

Di seguito verranno approfondite le caratteristiche delle principali materie prime utilizzate per la realizzazione della malta UNIVPM che in alcuni test verrà identificata con la sigla MAMMUT (Malta multifunzionale a basso impatto Ambientale per il risparmio energetico, il comfort e la salubrità degli ambienti di vita) e dei prodotti commerciali confrontati nella sperimentazione di questa tesi.

3.1. Materiali MAMMUT

La malta è un composto che si ottiene dalla miscelazione di acqua, legante e inerte fino. Le proprietà di tale conglomerato sono strettamente legate alla tipologia e alla qualità delle tre componenti utilizzate, nonché, dal loro differente dosaggio all'interno dell'impasto. La malta utilizzata in questa tesi è composta da aggregati non convenzionali in modo da ottenere una finitura con capacità disinfettanti in grado di purificare l'aria dalle sostanze aerodisperse. Per conferire agli impasti oltre le proprietà adsorbenti anche quelle di fotocatalisi, è stato aggiunto il TiO_2 .

Mammuto entra in un progetto Proof of Concept (PoC) finanziato dal fondo FASTER (Facilitare lo Sviluppo Tecnologico degli Esiti della Ricerca) dell'Università Politecnica delle Marche in risposta ad apposito bando del Ministero dello Sviluppo Economico. MAMMUT sviluppa una nuova generazione di finiture multifunzionali per applicazioni indoor capaci di migliorare il comfort e la salubrità degli ambienti di vita grazie alle elevate capacità fonoassorbenti e disinfettanti.

Impatto atteso:

- Ambienti più salubri, riducendo i costi sociali e correlati alle malattie respiratorie.
- Ambienti più confortevoli in termini di condizioni termo-igrometriche e acustiche.

- Finitura autopulente grazie alle aggiunte fotocatalitiche, con riduzione dei costi di manutenzione.
- Maggiore sostenibilità economica, grazie alla combinazione di diverse funzionalità in una singola finitura.
- Aumento dell'efficienza energetica degli edifici, grazie alla bassa conducibilità termica della formulazione.
- Impatto sulle PMI del settore delle costruzioni che possono competere con il nuovo prodotto nel mercato delle costruzioni sostenibili.
- Impatto dei Beni Culturali; la formulazione usata durante il restauro di edifici vincolati, migliora l'efficienza energetica e la qualità dell'aria indoor senza modificare l'involucro esterno dell'edificio.

Di seguito vengono presentati tutti i componenti del mix design:

Legante: calce idraulica

Il legante utilizzato per questa miscela è la calce idraulica. In generale un legante è una polvere che miscelata con acqua è in grado di formare una pasta facilmente modellabile e che perde, nel giro di qualche ora, la sua iniziale plasticità (presa) fino ad assumere una consistenza rigida (indurimento) con elevate capacità di resistenza meccanica. (26)

In particolare, le calce idrauliche sono quei prodotti derivanti dalla calcinazione di calcari marnosi o marne calcaree (miscele naturali che presentano dal 6 al 22% di argille o altri alluminosilicati idrati) sottoposti a cottura per una temperatura di circa 1000 °C. Con la cottura le materie prime subiscono una decomposizione: l'argilla va a formare silice, allumina e vapore acqueo. Con l'aumentare della temperatura si verifica la decomposizione termica della calce e la reazione di combinazione tra calce e silice e tra calce e allumina con la conseguente formazione dei tre prodotti che mescolati con l'acqua innescheranno la reazione di idratazione(26). Questo legante, quindi, reagisce con l'acqua e le altre componenti dando origine ai fenomeni di presa e di indurimento con la particolare capacità di sviluppare tali reazioni in acqua,

ovvero in assenza di aria. Quest'ultima proprietà permette di distinguere la calce aerea dalla calce idraulica. Durante il processo di idratazione, dai silicati, alluminati e ferriti di calcio presenti nel legante si originano i composti idrati che assicurano l'indurimento della malta e, una volta ultimato il periodo di stagionatura, si ha il raggiungimento delle proprietà meccaniche che resteranno stabili anche in ambienti dove è presente acqua.

La calce utilizzata in questa tesi è CALIX BLANCA NHL, è la calce idraulica bianca naturale di Italcementi, appartiene alla classe 3,5 con resistenza caratteristica a compressione maggiore o uguale a 3,5 MPa a 28 dal getto.



Figura 8 - Calce idraulica

Aggregati

Gli aggregati, anche detti inerti, sono dei materiali granulari che costituiscono la matrice resistente del calcestruzzo e mediamente rappresentano il 60-80% del volume complessivo del conglomerato.

La resistenza meccanica del calcestruzzo, così come quella delle malte dipende anche dalle proprietà chimico-fisiche dell'aggregato stesso.

Si distinguono, in base al diametro delle particelle in:

- Inerti finissimi (filler), $d < 0.063 \text{ mm}$
- Inerti fini (sabbia), $0.063 < d < 4 \text{ mm}$
- Inerti grossi (ghiaia o ghiaietto) $d > 4 \text{ mm}$

Ad essi vengono richieste, solitamente, resistenze meccaniche superiori a quelle delle paste cementizie con cui vengono utilizzati, in quanto rappresentano la componente principale. Inoltre, è richiesta l'assenza di gelività, l'assenza di cloruri che contribuiscono a processi di corrosione delle armature, l'assenza di solfati che provoca la formazione di prodotti espansivi come l'ettringite, reagendo con gli alluminati e l'assenza di impurità di vario genere.

Quanto detto è disciplinato dalla normativa europea UNI EN 13055:2003, che regola la conformità degli aggregati leggeri da utilizzare nei calcestruzzi e nelle malte.

Inerti: ceneri di biomassa

Uno degli inerti "non convenzionali" utilizzati in questa sperimentazione è la cenere di biomassa, che costituisce lo scarto di processi di combustione, nello specifico di trucioli o di altre tipologie di rifiuti del legno, per la produzione di energia nelle centrali elettriche. Esse sono una miscela di elementi minerali e componenti organici incombusti. Gli elementi che tipicamente compongono le ceneri sono la silice, il calcio, il potassio, il fosforo, il manganese, il ferro, lo zinco, il sodio e il boro. Tali elementi non si trovano in forma elementare ma sotto forma di ossidi, silicati e nitrati.

Le ceneri possono distinguersi in bottom ash e fly ash in base alla loro massa volumica e quindi alla loro capacità di accumularsi sul fondo della camera di combustione o di allontanarsi da essa sfruttando il flusso dei fumi di combustione.

Fly Ash

Le ceneri volanti si ottengono come sottoprodotto della combustione della biomassa dedicata nelle centrali termoelettriche e sono costituite dal solido particellare che viene separato dai fumi di combustione per mezzo di filtri elettrostatici o meccanici.

I dati relativi alla granulometria, assorbimento d'acqua e densità sono stati ricavati da studi precedenti.

Densità (g/cm³)	1,41
Diametro massimo (mm)	<0,063
Assorbimento d'acqua (%)	49%

Tabella 3- Caratteristiche aggregato



Figura 9 - Fly Ash

Bottom Ash

Le ceneri bottom si ottengono come sottoprodotto della combustione di biomassa dedicata nelle centrali termoelettriche e sono costituite da particelle più pesanti depositate alla base del forno.

La bottom ash in questione, essendo un materiale di risulta, ha una granulometria molto varia e sono presenti anche sassi e impurità più grossolane. Per utilizzarla nella nostra sperimentazione, è stata sottoposta a macinatura e setacciatura. La macinazione è stata effettuata utilizzando un mulino a sfere e in seguito il materiale ottenuto è stato sottoposto a setacciatura. Questa può avvenire sia in maniera manuale, dove il materiale viene adagiato sul setaccio a maglie con vaglio di 500 μm ed attraverso uno scuotimento manuale avviene la setacciatura e il materiale viene raccolto in un piatto inferiore o per via meccanica, per mezzo di un setaccio a maglie con vaglio da 500 μm . Il setaccio viene posto al di sopra di una pedana basculante meccanica che attraverso l'oscillazione (per sessioni di 5-6 minuti) del

supporto sposta il contenuto del setaccio favorendo il passaggio delle particelle attraverso le maglie.

I dati relativi all'assorbimento d'acqua e densità sono stati ricavati da studi precedenti.

Densità (g/cm³)	1,94
Diametro massimo (mm)	0,5
Assorbimento d'acqua (%)	20%

Tabella 4- Caratteristiche aggregato



Figura 10- Bottom Ash

Gel di silice

La silice colloidale è un composto chimico polimerico, a peso molecolare variabile, costituito da più unità di silice SiO_2 . La struttura molecolare conferisce al composto delle proprietà colloidali e un'elevata capacità di assorbimento dell'umidità. Si presenta in cristalli amorfi e la sua elevata igroscopicità è principalmente dovuta alla sua struttura cristallina che presenta internamente un elevato numero di pori. 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 del gel di silice.

La conformazione del gel di silice 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. Nelle miscele, il gel di silice utilizzato ha una densità SSA pari a 1,31 g/cm³ e si presenta sotto forma di granuli.

La condizione di saturazione con superficie asciutta è ottenuta aggiungendo l'86% di acqua al materiale secco.

Il gel di silice è fornito in granuli con diametro massimo di 7 mm. Il materiale granulare è stato macinato e setacciato, così che i granuli finali abbiano un diametro massimo di 300 µm. Lo strumento che permette di ottenere un aggregato di queste dimensioni è il mulino a sfere, composto da un asse rotante azionato da un motore elettrico e da dei contenitori di materiale ceramico con all'interno delle biglie che ne permettono la frantumazione.

Successivamente il materiale ottenuto è stato sottoposto a setacciatura manuale per mezzo di un setaccio a maglie con vaglio da 300 µm. Essa può avvenire anche mediante setacciatura meccanica dove il setaccio viene posto al di sopra di una pedana basculante meccanica che attraverso l'oscillazione (per sessioni di 5-6 minuti) del supporto sposta il contenuto del setaccio favorendo il passaggio delle particelle attraverso le maglie.

Data la sua grande versatilità, questo materiale viene impiegato per vari scopi ed utilizzi: negli adesivi e negli stucchi, nella composizione di alcuni farmaci in compresse, nella flocculazione di solidi dispersi in ambienti acquosi.

I dati relativi all'assorbimento d'acqua e densità sono riepilogati nella seguente tabella.

Densità (g/cm³)	1,31
Diametro massimo (mm)	0,3
Assorbimento d'acqua (%)	86%

Tabella 5- Caratteristiche aggregato



Figura 11- Gel di silice macinata

Additivi

Gli additivi sono sostanze chimiche, organiche o inorganiche, che vengono disciolte o disperse nell'acqua in piccole quantità (circa dal 0.2% al 2%), che modificano le proprietà chimiche e fisiche del materiale. Sono quindi utilizzati per migliorare le prestazioni del materiale.

Tra i vari additivi presenti nel mercato, definiamo i principali:

- Additivi fluidificanti
- Additivi super-fluidificanti
- Additivi acceleranti
- Additivi ritardanti
- Additivi areanti
- Additivi viscosizzanti
- Additivi antiritiro
- Additivi idrofobizzanti

Biossido di titanio TiO_2

Il biossido di titanio è un noto catalizzatore in grado di degradare per ossidazione numerosi composti organici. Nel dettaglio, questo composto è un ossido semiconduttore dotato di un'elevata reattività quando è sottoposto alla

luce UV. Attraverso l'assorbimento dei fotoni incidenti innesca dei processi fotochimici superficiali nelle finiture che lo contengono. Questa forte attività fotocatalitica, dovuta alle sue caratteristiche chimiche e fisiche, è stata oggetto di numerosi studi già a partire dal 1972 in Giappone, ma il processo di analisi si è intensificato soprattutto negli ultimi anni. L'importanza pratica del biossido di titanio è dimostrata dal suo utilizzo in processi elettrochimici e come pigmento per pitture e polimeri. Le proprietà ottiche ed elettroniche del TiO_2 hanno numerose applicazioni nei sensori di gas, nei rivestimenti antiriflettenti per celle solari e nei processi di conversione dell'energia fotochimica. Il biossido esiste in tre diverse strutture cristalline: rutilo, anatasio e brookite e in fase amorfa. La brookite ha una struttura ortorombica, le altre due invece, una struttura tetragonale. Il rutilo e l'anatasio sono le forme più diffuse in natura. Diversi studi hanno dimostrato che questo additivo è un catalizzatore molto efficace nella degradazione di composti inquinanti quando attivato da luce UV. Viene infatti aggiunto, in polvere o in sospensione, in molte miscele di prodotto di finitura del settore delle costruzioni come additivo autopulente e disinquinante. Inoltre, è uno dei migliori conduttori tra quelli studiati nel campo della conversione chimica e dell'immagazzinamento dell'energia solare. Il biossido di titanio utilizzato è AEROXIDE TiO_2 P 25. È un biossido di titanio purissimo particolato con elevata superficie specifica e struttura marcata di aggregati e agglomerati. Grazie alla sua elevata purezza, all'elevata superficie specifica e alla combinazione unica di anatasio (80%) e struttura cristallina rutilica (20% - catalizza la degradazione di molecole organiche e inorganiche quando è irradiato da luce UV), il prodotto è adatto per molte applicazioni catalitiche e fotocatalitiche.

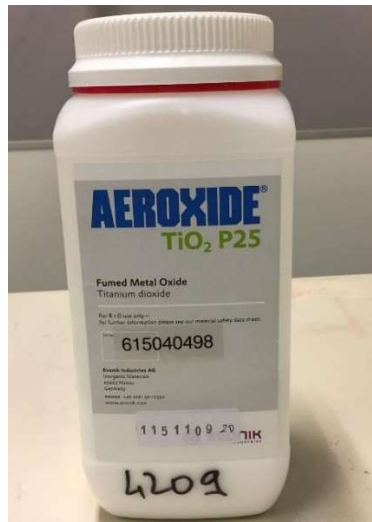


Figura 12- Biossido di Titanio Aeroxide

La sua struttura lo rende adatto anche come filtro UV efficace. Il prodotto è basato su una miscela di titanio e ossido di ferro. Superficie specifica di 50 m²/g, diametro medio delle particelle di 21 nm, densità di circa 3,1 g/cm³.



Figura 13- Biossido di Titanio (TiO₂)

Prima di impiegarlo nel mix design, il biossido di titanio AEROXIDE TiO₂ P 25 è stato testato in laboratorio per osservare la caratterizzazione fotocatalitica nel campo visibile e in quello UV; l'apparato e le condizioni di prova sono quelli suggeriti dalla norma UNI 11247, che usa un flusso continuo per la determinazione della degradazione degli ossidi di azoto nell'aria ad opera di materiali fotocatalitici inorganici. Il flusso di NO_x all'interno del reattore, fornito

da un serbatoio (499 ppb NO) (SAPIO Srl, Monza, Italia), è mantenuto costante da un sistema di diluizione (Calibrator 8188, Rancon Instruments spa, Milano, Italia) che usa aria atmosferica a $T = 27 \pm 2^\circ\text{C}$ e $UR = 45 \pm 5\%$.

Il campione in esame di Aeroxide P-25 è stato posizionato internamente al centro di un reattore, costituito da un cilindro in vetro Pyrex da 3L. Per la caratterizzazione fotocatalitica nell'UV, il campione è stato irraggiato dall'esterno con una Lampada UV alogena da 400W, con un'irradianza misurata sulla superficie del campione di 20 W/m^2 . Per la caratterizzazione fotocatalitica nel VISIBILE, il campione è stato irraggiato dall'esterno con una lampada alogena Philips da 42 W.

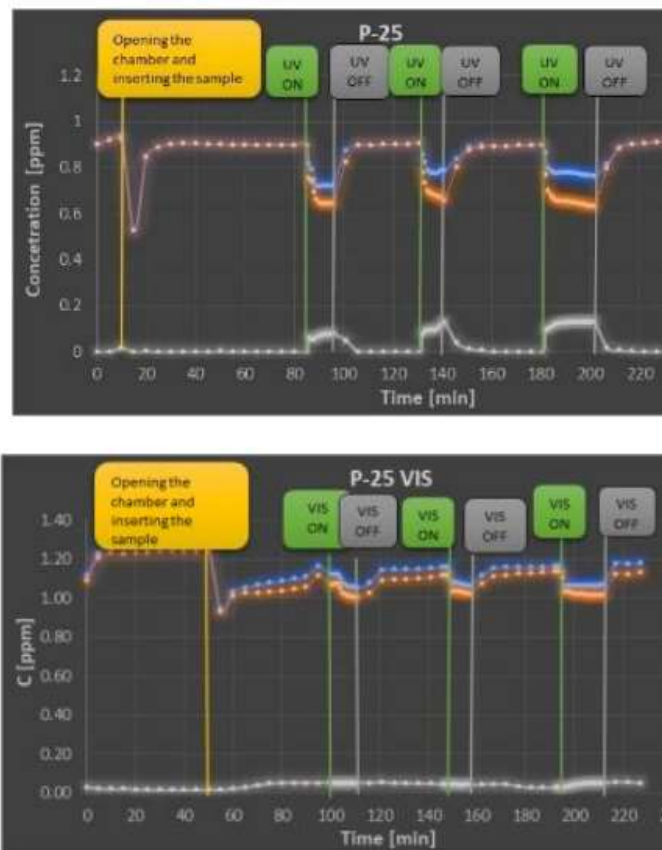


Figura 14 - Risultati dell'attività fotocatalitica del TiO_2 sia nell'UV sia nel VISIBILE

Antiritiro

I riduttori di ritiro (SRA - shrinkage reducing admixtures) sono prodotti liquidi a base di sostanze organiche che agiscono sulla tensione superficiale dell'acqua presente nei micropori del materiale e fanno diminuire il ritiro igrometrico e quello plastico provocati dall'evaporazione dell'acqua nello stato rispettivamente indurito e fresco.

Si deve tener conto che, sebbene questi additivi facciano diminuire il ritiro per essiccamento, essi possono influenzare anche altre caratteristiche del materiale come la resistenza meccanica, il modulo di elasticità, ecc.

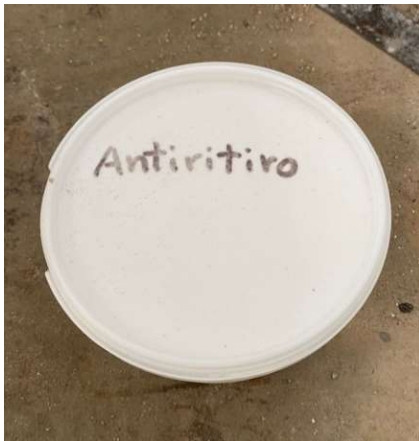


Figura 15- Antiritiro



Figura 16- Antiritiro

Cellulosa

La cellulosa è uno dei più importanti polisaccaridi. È un polimero, ovvero è costituita da un gran numero di molecole di glucosio unite grazie a un legame che prende il nome di glicosidico. La molecola è contenuta principalmente nei vegetali. La catena polimerica non è ramificata. In ambito delle costruzioni è una cellulosa modificata in polvere specifica per rasanti, finiture civili e monostrati a base cemento.

Le sue caratteristiche sono quelle di:

- migliorare la ritenzione d'acqua e la scorrevolezza;
- permettere la sovrapposizione di più spessori;
- facilitare l'adesione al supporto;

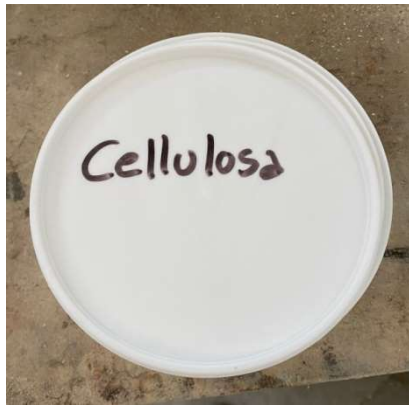


Figura 18- Cellulosa



Figura 17- Cellulosa

Fluidificante

I fluidificanti e plasticizzanti o "riduttori di acqua", migliorano la lavorabilità del materiale. Tali additivi inoltre, poiché determinano una diminuzione della tensione superficiale dell'acqua di impasto, consentono di ridurre il fabbisogno d'acqua per la data consistenza desiderata. Pertanto ne risulta un aumento della resistenza caratteristica a compressione (R_{ck}) e una migliore durabilità. Riducono anche il ritiro igrometrico. Erano di norma a base di ligninsolfonato ottenuto come residuo dell'estrazione della cellulosa dal legno.(13)



Figura 20- Fluidificante



Figura 19 - Fluidificante

3.2. Materiali DIASEN

Limepaint

È un'idropittura a base di calce di colore bianco per interni. Caratterizzata da ottima capacità coprente, presenta un'elevata traspirabilità che contribuisce a regolare l'equilibrio igrometrico degli ambienti, scongiurando la formazione di muffe e contribuendo al benessere indoor.



Figura 21 - Confezione idropittura Limepaint DIASEN

Calce storica

Calce Storica è una malta monocomponente premiscelata a base di calce idraulica naturale NHL 5, completamente priva di cemento, caratterizzata da ottime resistenze meccaniche ed elevata adesione al supporto. Calce Storica è ideale per il consolidamento ed il ripristino di strutture in muratura, anche in zone sismiche. Calce Storica ha una classe di resistenza M15 secondo la norma UNI EN 998-2.

3.3. Preparazione miscele

Per effettuare l'allestimento della prova in sito è stato necessario preparare il premiscelato UNIVPM seguendo il mix design della finitura. Il mix-design rappresenta il progetto di miscela, ovvero il calcolo della composizione di calcestruzzi e malte a partire dalle prestazioni richieste (lavorabilità, resistenza meccanica, durabilità, ecc.), delle caratteristiche delle materie prime disponibili (leganti, aggregati, additivi) e dalle condizioni ambientali in servizio.

La malta si ottiene mescolando omogeneamente e in proporzioni ben definite, legante, acqua, inerti e additivi così come riportato nella norma UNI EN 1015-11:2019. In questo caso studio la malta è data dalle seguenti componenti:

- H₂O
- Calce
- Silica gel
- Bottom ash
- Fly ash
- TiO₂
- Additivo antiritiro
- Additivo fluidificante
- Cellulosa

L'applicazione avverrà in 2 strati, fino a raggiungere la dimensione totale di 0.3 cm. In particolare, avrà la stessa miscela dello strato più superficiale ma senza il TiO₂.

Tabella riassuntiva delle quantità [g] utilizzate per confezionare la malta per 1,13846 l di getto:

COMPONENTI	H ₂ O	CALCE	SILICA GEL	BOTTOM ASH	FLY ASH	TiO ₂	ANTIRITIRO	CELLULOSA	FLUIDIFICANTE
Unità di misura	g	g	g	g	g	g	g	g	g
STRATO 1	4387	3109	1451	1665	1451	0	38,38	53,74	1,54
STRATO 1	4387	3109	1451	1665	1451	185	38,38	53,74	1,54

TOTALE	877 4	6218	2902	3330	290 2	18 5	76,76	107,48	3,08
---------------	----------	------	------	------	----------	---------	-------	--------	------

Tabella 6- Quantità componenti mix design espresse in grammi [g]

Tabella riassuntiva delle quantità [g/l] utilizzate per confezionare la malta per 1,13846 l di getto:

COMPONENTI	H2O	CALCE	SILICA GEL	BOTTOM ASH	FLY ASH	TiO ₂	ANTIRITIRO	CELLULOSA	FLUIDIFICANTE
Unità di misura	g/l	g/l	g/l	g/l	g/l	g/l	g/l	g/l	g/l
TOTALE	541,55	383,85	179,19	205,54	179,19	22,84	4,74	6,63	0,19

Tabella 7- Quantità componenti mix design espresse in grammi/litro [g/l]

COMPOSIZIONE PERCENTUALI DEI COMPONENTI DELLA MALTA INNOVATIVA

■ Calce ■ Silica gel ■ Bottom Ash ■ Fly Ash ■ TiO₂ ■ Antiritiro ■ Cellulosa ■ Fluidificante

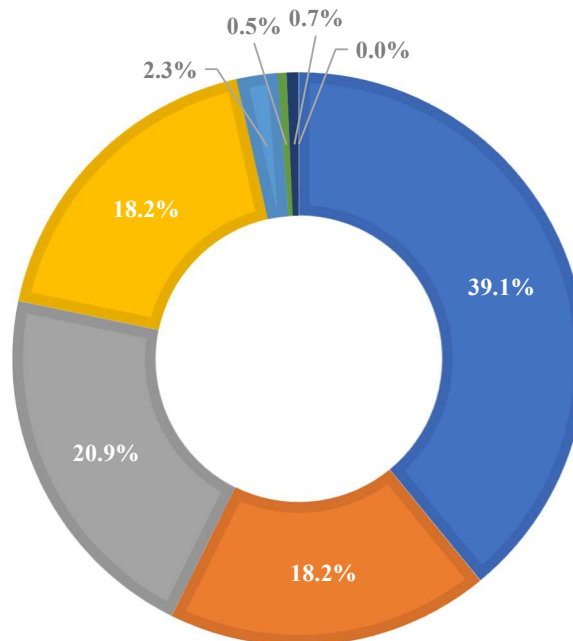


Grafico 1 - Composizione percentuali dei componenti della malta innovativa

3.4. Caratterizzazione delle malte

Per valutare mediante test in scala di laboratorio le prestazioni della finitura brevettata rispetto a quelle di riferimento commerciali, sono stati confezionati differenti provini, ottenuti con diverse combinazioni di sottofondi e finiture. Per questa sperimentazione sono stati confrontati soltanto i valori dei provini con sottofondo calce storica (C) e finitura Limepaint oppure finitura UNIVPM con TiO_2 del tipo Aeroxide T1. I provini testati in scala laboratorio hanno forma cilindrica con diametro 8 cm e altezza pari a 0,8cm di sottofondo in calce e successivo spessore variabile di finitura. Le caratteristiche di questi provini valutate in laboratorio vengono poi confrontate con un riferimento scelto dalla letteratura.

- C-L = Calce Storica + Limepaint
- C-UNI-T1 = Calce Storica + finitura UNIVPM + TiO_2 1 (Aereoxide P25)

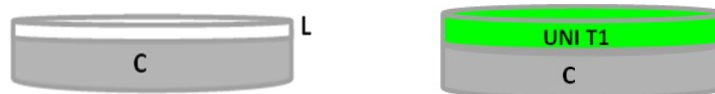


Figura 22 - Rappresentazione provino C-L, C-UNI-T1

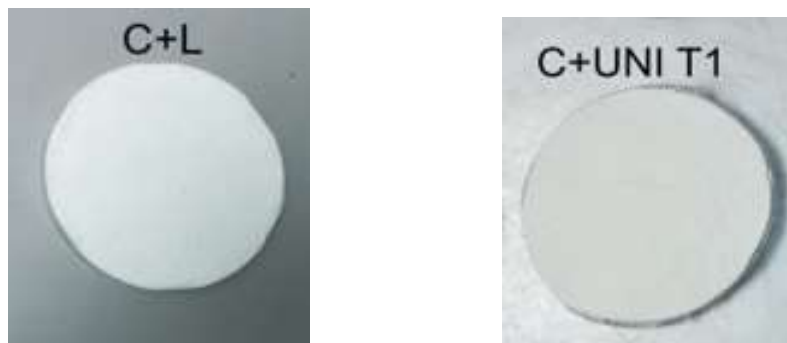


Figura 23 - Provini cilindrici diametro 8 cm C-L, C-UNI-T1



Figura 24- Provini cilindrici diametro 8 cm C-L, C-UNI-T1

Nella letteratura non si è individuato un unico studio che fornisse informazioni su tutte le proprietà testate in laboratorio per i provini di questa tesi. Per questo motivo, il confronto delle proprietà ottiche e fotocatalitiche è stato eseguito adottando come riferimento il provino di malta cementizia con diametro 8,6 cm e contenente TiO_2 (PC-105 della Millennium Chemicals, attualmente denominato Crystal) al 2,5% studiato nel lavoro di Aïssa et al. (2011). La preparazione della malta si è basata sulla metodologia della norma NF EN 196.1 e per la sua miscela sono stati utilizzati i seguenti rapporti in peso: 2/9 di cemento + TiO_2 , 6/9 di sabbia normalizzata e 1/9 di acqua. TiO_2 in polvere è stato aggiunto al cemento secco prima della miscelazione e della successiva aggiunta di acqua. Per il confronto delle proprietà termiche e igrometriche si è scelto il provino di malta da intonaco multifunzionale che contiene nanoparticelle di TiO_2 (2 % in peso) e 0-1 % in peso di fibre di due dimensioni distinte: $1 \text{ mm} < d < 2 \text{ mm}$ (Fb mm) e $2 \text{ mm} < d < 4 \text{ mm}$ (Fb). Questo provino e relativi dati sono stati elaborati dallo studio di Senff et al. (2018) che aveva come obiettivo l'indagine dell'influenza di % crescenti di cellulosa (0-4%) nel mix design rispetto alle prestazioni delle malte stesse.

Dei provini preparati in dipartimento dell'UNIVPM per questa tesi e dei riferimenti presi dalla letteratura, sono state confrontate le seguenti proprietà: emissività

- riflettanza
- assorbanza
- SRI (indice di riflettanza solare)
- attività fotocatalitica
- trasmittanza (conducibilità termica)
- permeabilità al vapore
- MBV

Emissività

L'emissività di un corpo è la frazione di energia irradiata da quel materiale rispetto all'energia irradiata da un corpo nero che sia alla stessa temperatura e viene misurata con uno strumento chiamato emissometro.



Figura 25 - Emissometro

Qualunque oggetto reale, o corpo grigio, ha un valore di emissività compreso tra 0 e 1. Il provino con bassa emissività è capace di riflettere tutte le onde incidenti; infatti, il calore che incide sul corpo viene tutto riflesso.

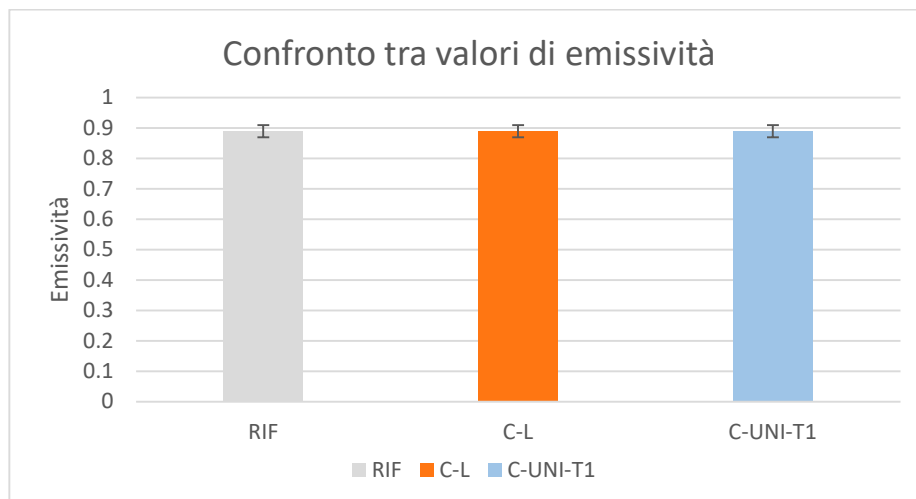


Grafico 2 - Confronto tra valori di emittanza medi dei provini

I valori di emissività, che oscillano intorno a 0,89 per tutti i provini analizzati, mostrano l'elevata capacità di tutte le malte di irradiare l'energia posseduta. Anche il provino di riferimento si attesta intorno allo stesso valore. L'elevato valore di emissività è influenzato dalla rugosità della superficie del sottofondo, vantaggio che non si avrebbe se si posasse la finitura su un sottofondo liscio.

Riflettanza

La prova di riflettanza consente di valutare la capacità dei campioni di riflettere la luce monocromatica. La prova viene eseguita mediante uno spettroscopio che consente di misurare gli spettri di riflessione dei campioni. Lo spettrofotometro permette di ottenere un grafico per ogni campione analizzato nel quale viene indicato quanto ogni campione riflette ad ogni lunghezza d'onda.

Dallo spettrofotometro sono stati ricavati i valori della % di riflettanza dei provini per ogni lunghezza d'onda.

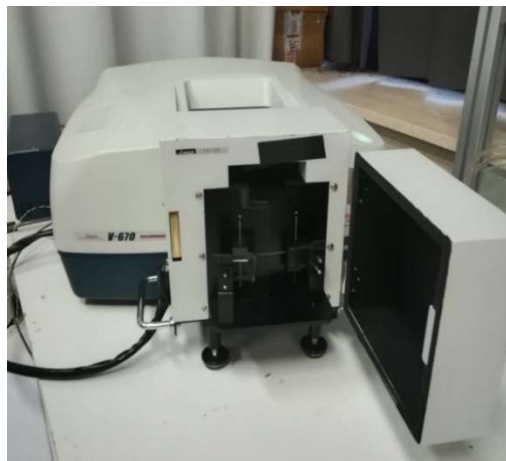


Figura 26 - Spettrofotometro

Dai grafici si può osservare che man mano che cresce la λ (in particolare per $\lambda > 2300$ nm), lo strumento risulta essere meno preciso ed i dati risultano essere affetti da errori.

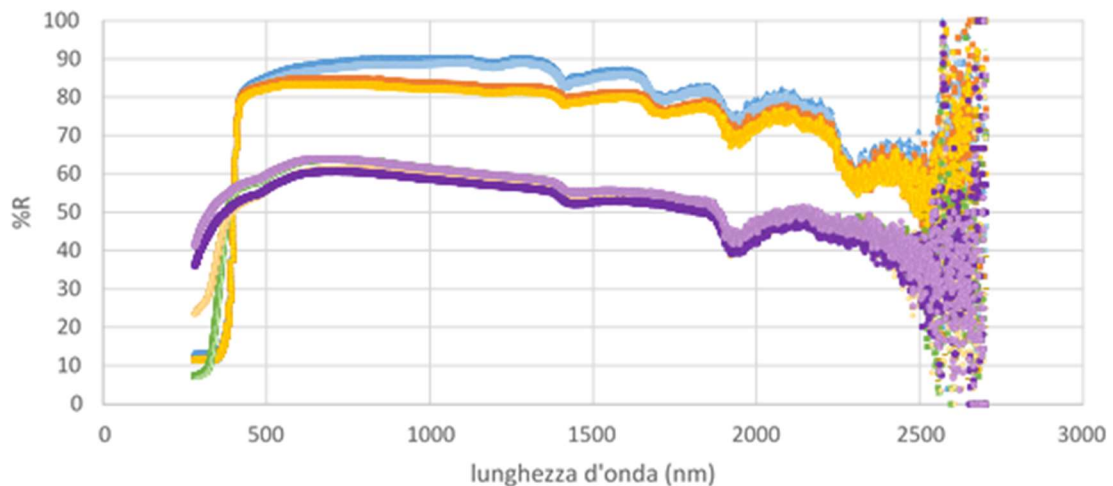


Grafico 3- Confronto delle riflettanze dei provini

La finitura UNIVPM (verde, viola e lilla) presenta un valore di riflettanza più basso (con un picco intorno a massimo 60%) rispetto alla finitura commerciale (giallo, arancio, azzurro) per ogni λ . Il provino C-L assume infatti valori compresi tra 80 e 90% con lunghezze d'onda superiori a 480nm. La riflettanza del riferimento, i cui spettri sono stati registrati da 250 a 800 nm, mostra nel visibile una riflettanza di ca. 60%, come la finitura UNIVPM. Nella regione UV (100-400 nm), la riflessione diminuisce bruscamente a $\lambda \leq 390$ nm quando diminuiscono le lunghezze d'onda.

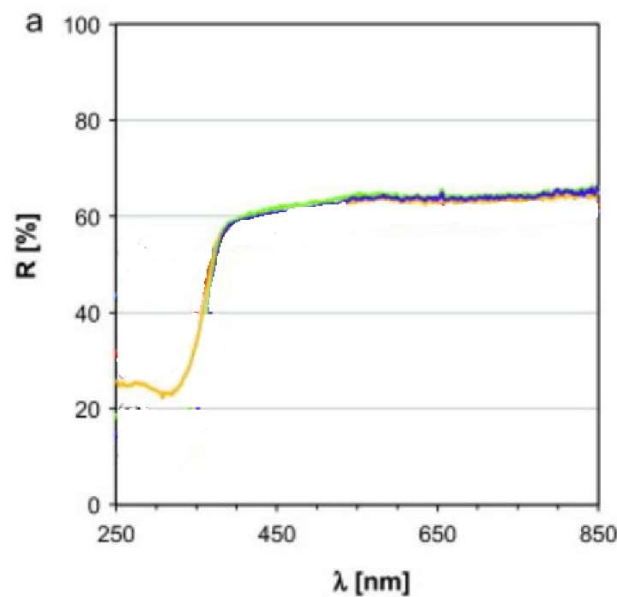


Grafico 4 - Spettro di riflettanza diffusa UV-visibile della malta RIF contenente TiO_2 al 2,5% in peso

Questo è dovuto al fatto che il provino UNIVPM e quello di riferimento presentano una colorazione più scura tendente al grigio; il colore bianco è in grado di riflettere maggiormente rispetto al grigio la radiazione solare nel campo del VIS (400-780 nm). Anche nell'infrarosso ($\lambda > 780$ nm), dove si concentra circa la metà dell'energia solare, la riflettanza solare delle finiture UNIVPM e riferimento risultano più bassa rispetto ai provini C+L.

SRI

L'SRI tiene conto sia di quanto una superficie riflette, sia di quanto una superficie emette. Questo parametro consente di valutare quale è l'apporto termico di una superficie sull'isola di calore. Per la determinazione dell'SRI sono necessarie sia la prova di riflettanza, che la prova di emissività. I valori ricavati dalla prova di riflettanza sono stati, in primo luogo, ponderati con i valori relativi allo spettro di emissione del sole ETR secondo la normativa ASTM G173/3.

ASTM G173-03 Reference Spectra

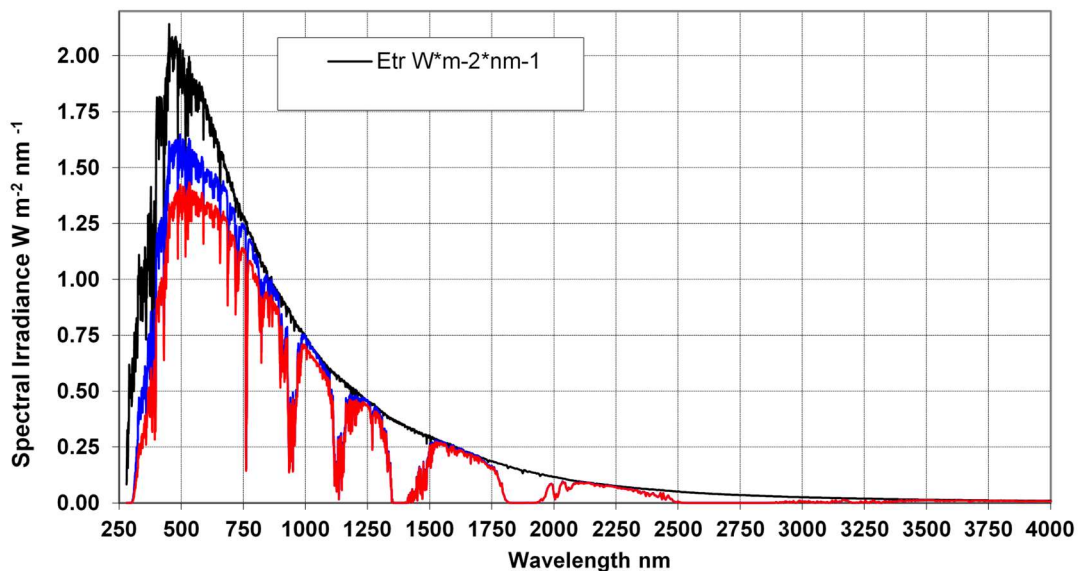


Grafico 5- Spettro dell'emissione solare ETR

Ogni valore di R [%], per ogni lunghezza d'onda, calcolato per ciascun campione, è stato moltiplicato per la curva di emissione solare ETR. I valori di

riflettanza dei provini superiori ad una λ di 2500 nm sono stati esclusi perché affetti da interferenze. La normativa G173-03 prevede un passo di 0.5 nm per λ relativi allo spettro di emissione solare da 280 a 350 nm. Il passo diventa poi variabile; assume valore pari ad 1 da 351 a 1700 nm, vengono poi riportati i valori di ETR per le lunghezze d'onda pari a 1700, 1702 e 1705 nm, infine da 1705 a 2500 nm il passo diventa pari a 5. Il passo utilizzato per la prova di emittanza con lo spettrofotometro è pari a 0.5, dunque per il confronto dell'R% con ETR sono stati eliminati tutti i valori non inclusi nel passo dello spettro solare fornito dalla normativa. In seguito, è stata calcolata il fattore di riflessione solare medio pe facendo la media dei risultati ottenuti moltiplicando R% con ETR per ciascun provino. Il risultato è stato diviso per 100 dato che il valore di riflettanza ottenuto dallo spettrofotometro risulta essere in %. Inoltre, si è calcolata la media dei valori pe ottenuti dai provini costituiti dalla stessa finitura, sui quali è stata effettuata 2 volte la prova di riflettanza.

Provini	RIF	C-L	C-UNI-T1
Media pe	0,44	0,575	0,44

Tabella 8- Fattore di riflessione solare medio

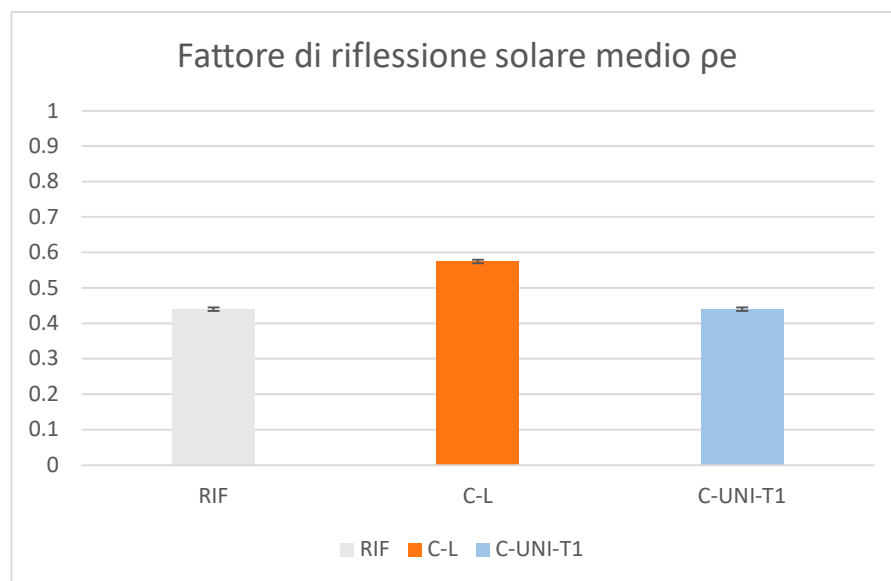


Grafico 6- Fattore di riflessione solare medio pe

Il fattore di assorbimento solare α_e è stato determinato mediante la relazione:

$$\alpha_e = 1 - \rho_e$$

Provini	RIF	C-L	C-UNI-T1
α_e	0,56	0,545	0,56

Tabella 9- Fattore di assorbimento solare α_e

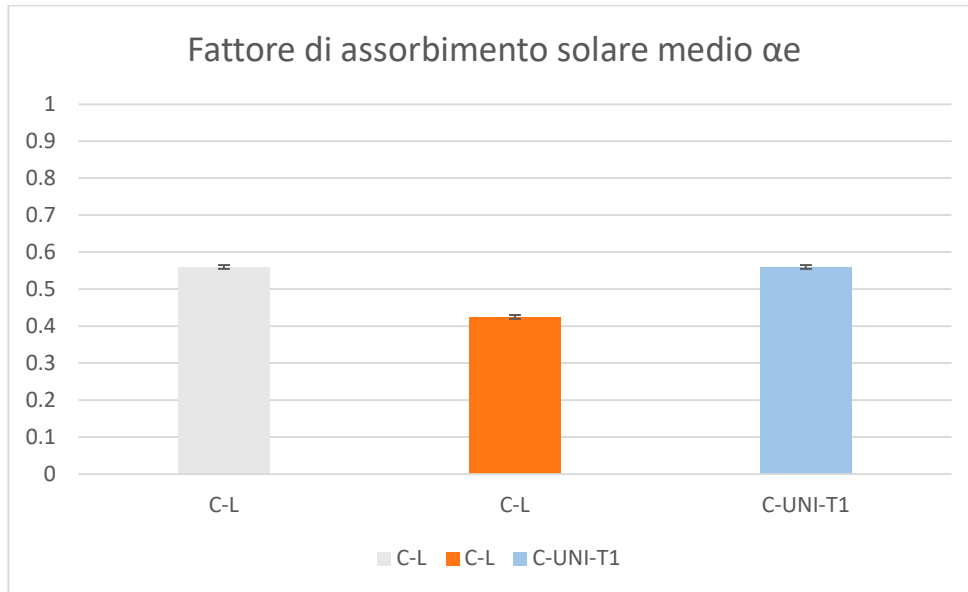


Grafico 7- Confronto del fattore di assorbimento solare

La temperatura superficiale stazionaria "Ts" e l'indice di riflessione solare "SRI" sono stati quindi determinati in accordo alla norma ASTM E1980-11 (Approccio 1) in corrispondenza di tre valori per il coefficiente convettivo di scambio termico "hc":

- $H_c = 5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ che corrisponde a una velocità dell'aria bassa (da 0 a 2m/s)
- $H_c = 12 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ che corrisponde ad una velocità dell'aria media (da 2 a 6 m/s)
- $H_c = 30 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ che corrisponde ad una velocità dell'aria alta (da 6 a 10 m/S)

e in condizioni ambientali e solari standard definite da:

- flusso solare = $1000 \text{ W}/\text{m}^2$

- temperatura ambiente dell'aria = 310K (pari a 37°C)
- temperatura del cielo = 300K (pari a 27°)

le superfici standard sono così state definite:

bianco standard: fattore di riflessione solare 0.8 ed emissività 0.9

nero standard: fattore di riflessione solare di 0.05 ed emissività 0.9

L'indice di riflessione solare "SRI" è stato determinato secondo la seguente formula riportata in ASTM E1980-11 paragrafo 4:

$$SRI = 100 \frac{(T_b - T_s)}{(T_b - T_w)}$$

Dove:

T_w = temperatura stazionaria della superficie bianca standard, espressa in K;

T_b = temperatura stazionaria della superficie standard nera, espressa in K;

T_s = temperatura superficiale stazionaria, espressa in K.

L'indice di riflessione solare "SRI" rappresenta quindi la temperatura stazionaria di una superficie " T_s ", dipendente dal fattore di riflessione solare, dall'emissività termica e dal coefficiente di scambio termico convettivo, valutata rispetto a quella del bianco standard e a quella del nero standard in condizioni ambientali e solari standard.

L'indice di riflettanza solare (SRI) è una misura della riflettanza solare e dell'emissività dei materiali che può essere utilizzata come indicatore di quanto è probabile che diventino caldi quando la radiazione solare incide sulla loro superficie. I valori dell'indice di riflessione solare variano tra 0 e 100. Più basso è l'SRI, più è probabile che un materiale diventi caldo alla luce del sole.

C+L	Unità di misura	Bianca standard	Nera standard	Reale	Bianca standard	Nera standard	Reale	Bianca standard	Nera standard	Reale
Coefficiente di riflessione solare		0,8	0,05	0,575	0,8	0,05	0,575	0,8	0,05	0,575
Coefficiente di assorbimento solare		0,2	0,95	0,425	0,2	0,95	0,425	0,2	0,95	0,425
Flusso Solare I	W/mq	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
Emissività Totale		0,9	0,9	0,89	0,9	0,9	0,89	0,9	0,9	0,89
Temperatura del cielo	K	300	300	300	300	300	300	300	300	300
Coefficiente di scambio convettivo	W/mqK	5	5	5	12	12	12	30	30	30
Temperatura dell'aria	K	310	310	310	310	310	310	310	310	310
Temperatura stazionaria superficie	K	322,632	378,636	340,521	318,058	355,926	329,849	313,866	334,370	320,133
	°C	49,482	105,486	67,371	44,908	82,776	56,699	40,716	61,220	46,983
SRI		68,057			68,864			69,436		

Tabella 10 - Calcolo SRI per il provino C-L

C+UNI T1	Unità di misura	Bianca standard	Nera standard	Reale	Bianca standard	Nera standard	Reale	Bianca standard	Nera standard	Reale
Coefficiente di riflessione solare		0,8	0,05	0,44	0,8	0,05	0,44	0,8	0,05	0,44
Coefficiente di assorbimento solare		0,2	0,95	0,56	0,2	0,95	0,56	0,2	0,95	0,56
Flusso Solare I	W/mq	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
Emissività Totale		0,9	0,9	0,89	0,9	0,9	0,89	0,9	0,9	0,89
Temperatura del cielo	K	300	300	300	300	300	300	300	300	300
Coefficiente di scambio convettivo	W/mqK	5	5	5	12	12	12	30	30	30
Temperatura dell'aria	K	310	310	310	310	310	310	310	310	310
Temperatura stazionaria superficie	K	322,632	378,636	350,846	318,058	355,926	336,760	313,866	334,370	323,848
	°C	49,482	105,486	77,696	44,908	82,776	63,610	40,716	61,220	50,698
SRI		49,622			50,615			51,318		

Tabella 11 - Calcolo SRI per il provino C-UNI-T1

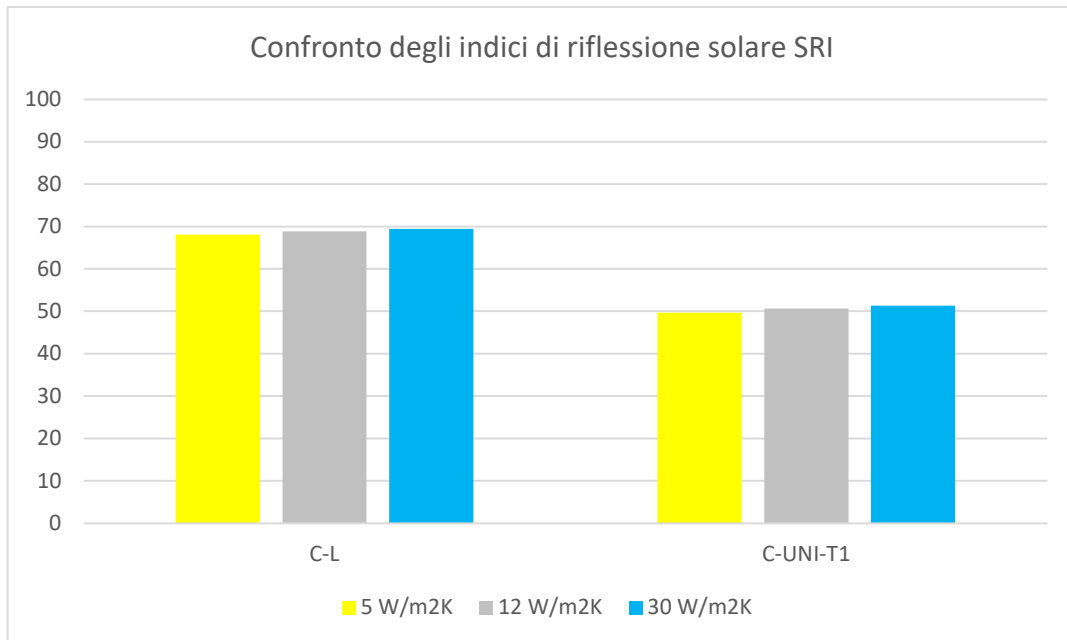


Grafico 8 - Confronto degli indici di riflessione solare SRI dei provini C-L e C-UNI-T1

I valori SRI della finitura con malta UNIVPM risultano essere più bassi rispetto a quelli della finitura commerciale. C+UNI T1 presenta un SRI che oscilla intorno al valore 50. Ciò significa che d'estate, la malta sarà mediamente in grado di riflettere la radiazione solare incidente, assorbendone solo in parte; l'ambiente interno dell'abitazione resterà meno fresco rispetto all'uso di una finitura commerciale. Al contrario, d'inverno, il contributo dell'assorbimento ed emissione delle onde solari incidenti sulla malta UNIVPM garantirà un ambiente più caldo. Dal riferimento non si ha alcun dato in riferimento alla

prova per determinare l'SRI. Comunque sia per una finitura indoor, un valore SRI=50, anche se non molto elevato, è accettabile e confrontabile con i valori per una malta da interno forniti dalla letteratura. In applicazioni outdoor invece, finiture con elevato assorbimento solare, non essendo capaci di emettere il calore assorbito irradiandolo nuovamente verso l'esterno, possono causare il surriscaldamento degli edifici e l'innalzamento della temperatura media delle aree urbane, superando quella degli spazi verdi (effetto isola di calore urbana).

Fotocatalisi

Per quanto riguarda la caratterizzazione fotocatalitica, l'apparato e le condizioni di prova sono quelli suggeriti dalla norma UNI 11247, che usa un flusso continuo per la determinazione della degradazione degli ossidi di azoto nell'aria ad opera di materiali fotocatalitici inorganici. Il flusso di NO_x all'interno del reattore, fornito da un serbatoio (499 ppb NO) (SAPIO Srl, Monza, Italia), è mantenuto costante da un sistema di diluizione (Calibrator 8188, Rancon Instruments spa, Milano, Italia) che usa aria atmosferica a $T = 27 \pm 2^\circ\text{C}$ e $UR = 45 \pm 5\%$. I campioni in esame sono posizionati internamente al centro di un reattore, costituito da un cilindro in vetro Pyrex da 3L. Per la caratterizzazione fotocatalitica nell'UV, il campione è stato irraggiato dall'esterno con una Lampada UV alogena da 400W, con un'irradianza misurata sulla superficie del campione di 20 W/m^2 . Per la caratterizzazione fotocatalitica nel VISIBILE, il campione è stato irraggiato dall'esterno con una lampada alogena Philips da 140 W.

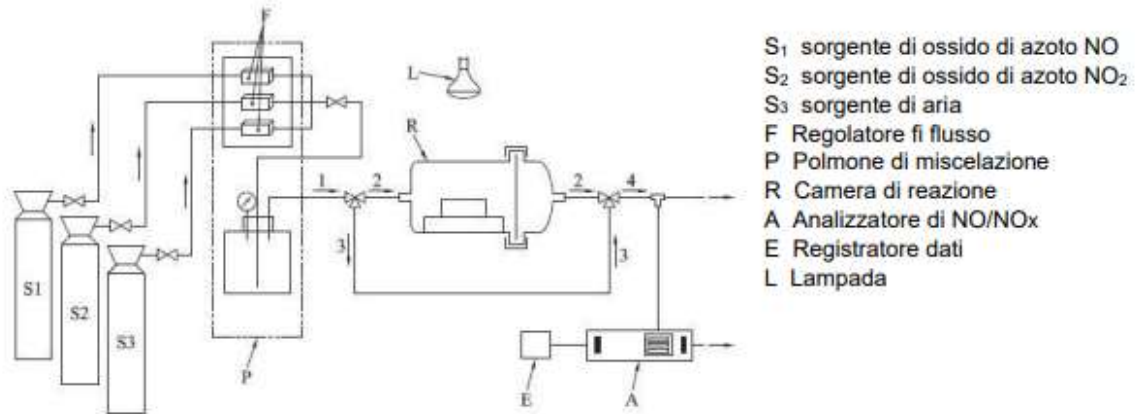


Figura 27 - Schema apparecchiatura di prova



Figura 28 - Apparato per la caratterizzazione fotocatalitica nel VISIBILE con lampada alogena Philips da 140 W

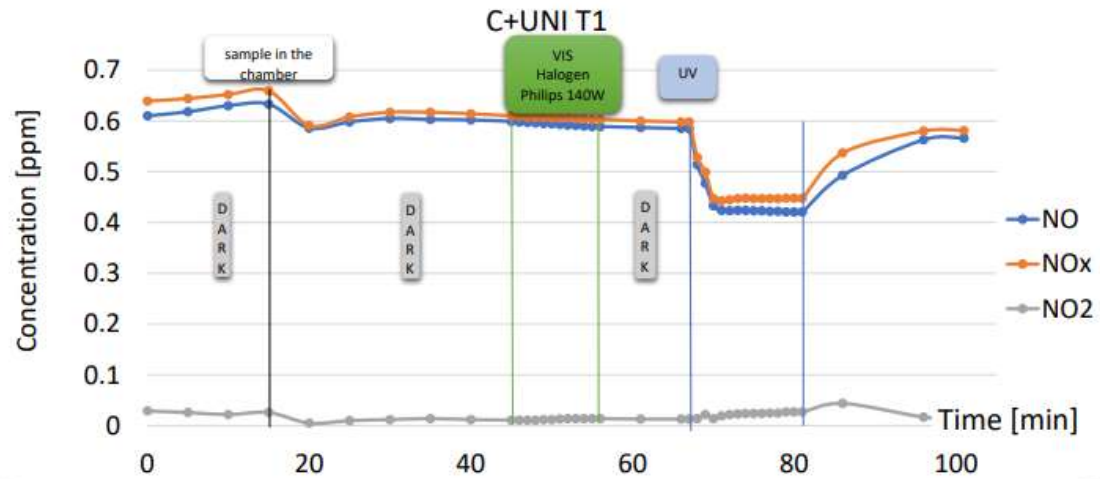


Figura 29 - Risultati della prova di fotocatalisi del provino C-UNI-T1 nel VIS e nell'UV

Come si può osservare anche dal grafico della % di rimozione degli NO, il TiO_2 , che in lavori precedenti effettuati in laboratorio aveva mostrato migliori prestazioni fotocatalitiche sia nel VIS sia nell' UV (vedi figura 14), quando esso viene aggiunto nella finitura UNIVPM le prestazioni nel VIS vengono quasi annullate. Quindi nel campo VIS anche l'agente fotocatalitico commerciale T1 (P25) quando immerso nella finitura perde completamente la sua efficacia. Rimane invece una certa attività fotocatalitica nell'UV anche se non molto elevata; questo può derivare da una concentrazione bassa del fotocatalizzatore all'interno della finitura del provino. In particolare, dai risultati si dimostra che non vi è alcuna attività fotocatalitica nel VIS mentre nell'UV degrado del 28% di NO e produzione del 3% di NO_2 . Confrontando i valori con lo studio di Senff et al. (2018), il provino che si è scelto come riferimento ha buoni risultati della degradazione fotocatalitica di NO_x ma non superano quelli ottenuti con C-UNI-T1; infatti, a parità di condizioni, l'abbattimento fotocatalitico del riferimento si stabilizza a massimo il 18% dopo 60 minuti di esposizione alla luce della lampada Osram UV alogena da 400W che è stata posta a una distanza di 85 cm dai campioni. L' intensità della luce che raggiunge i campioni è stata misurata essendo di circa 2,9 W/m nella gamma UVA ($315 \text{ nm} < \lambda < 400 \text{ nm}$) e 18,6 W/m nella gamma della luce visibile. Provini cilindrici ($\varphi = 120 \text{ mm}$ e $h = 20 \text{ mm}$) sono stati induriti in condizioni controllate (come descritto in 2.1) e testati dopo 28 giorni di indurimento.

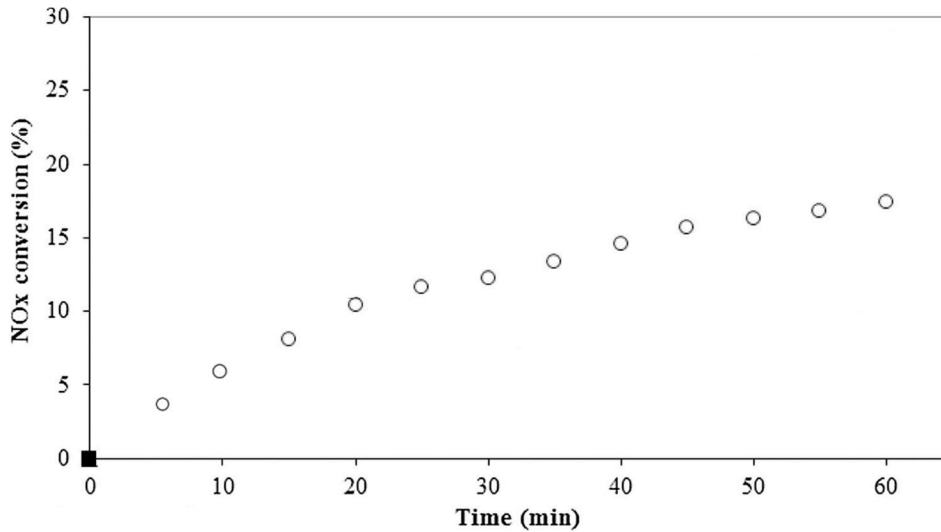


Grafico 9 - Risultati di degradazione (%) degli NO della malta riferimento

Non sono stati inseriti valori nel visibile in quanto l'effetto fotocatalitico non è evidente, come accade per i provini C-UNI-T1. Dopo l'accensione della lampada UV, la percentuale di rimozione della formaldeide dovuta alla matrice cementizia oscilla tra il 40% e il 65% (linea blu (c)) nel grafico seguente, valori percentuali molto superiori rispetto a quelli ottenuti con i provini di questa sperimentazione. Questa differenza potrebbe essere dovuta alla matrice di sottofondo che nel caso di Senff e al. è a base cementizia mentre quella UNIVPM (provini C-L e C-UNI-T1) è una malta a base di calce e materiali di recupero.

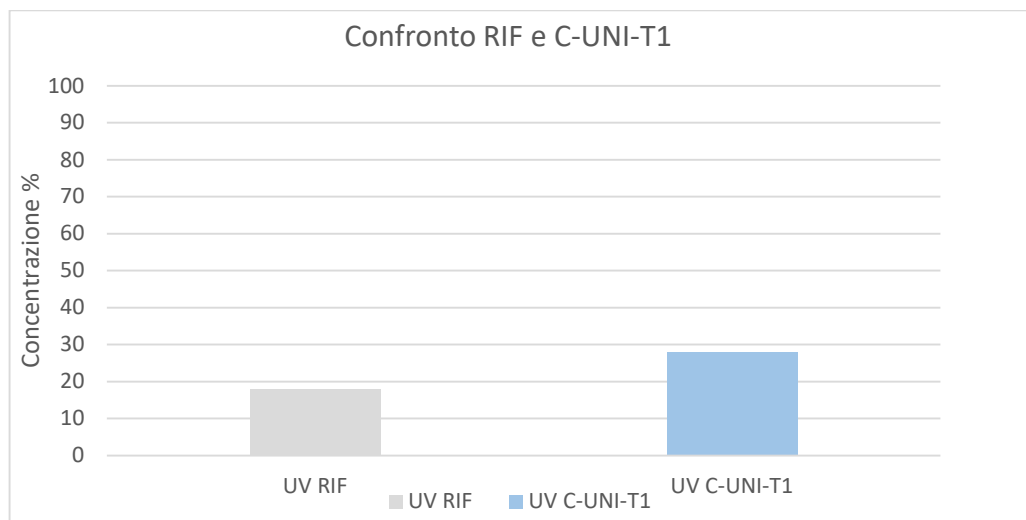


Grafico 10 - Confronto della % di rimozione di NO sotto radiazione UV del provino C-UNI-T1 e del il provino di riferimento

Conducibilità termica e densità

La conduzione termica è il trasferimento di energia che si verifica per interazione a livello microscopico tra le particelle adiacenti di un corpo. In particolar modo, la conduttività termica (indicata con λ) si riferisce alla capacità intrinseca di un materiale di trasferire o condurre calore ed è anche definita come la quantità di calore per unità di tempo e per unità di superficie che può essere condotta attraverso una lastra di spessore unitario di un dato materiale, le cui facce della lastra presentano un gradiente di temperatura. Infatti, il calore si muove lungo un gradiente di temperatura, da un'area ad elevata temperatura ed alta energia molecolare ad un'area con una temperatura più bassa e una minore energia molecolare. Questo trasferimento continuerà fino al raggiungimento dell'equilibrio termico. La velocità con cui il calore viene trasferito dipende dall'entità del gradiente di temperatura e dalle caratteristiche termiche specifiche del materiale. Per la misura, lo strumento impiegato è un termoflussimetro realizzato nel Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche UNIVPM.

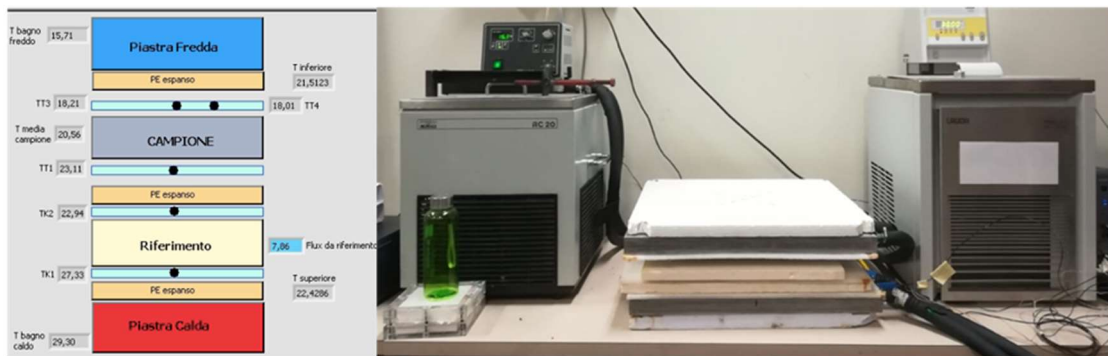


Figura 30 - Schema di funzionamento e termoflussimetro con provino inserito

Nota il flusso termico che attraversa i provini in analisi e nota la geometria del provino, è possibile ricavare il valore del coefficiente λ grazie alla relazione:

$$\lambda = \frac{Q}{A} \cdot \frac{L}{\Delta T}$$

dove

- λ è la conducibilità termica W/(mK)
- 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

Valori di λ bassi sono tipici per materiali isolanti, mentre valori elevati di λ sono associati a buoni conduttori di calore. Qui di seguito vengono raccolti i dati ottenuti dalla prova con i provini C-L e C-UNI-T1 confrontati con i valori trovati in letteratura e riguardanti il provino RIF (formulazioni 0.0Fb_(1-2 mm) +0.0Fb_(2-4 mm)) di malta da intonaco multifunzionale utilizzato nello studio di Senff et al. (2018).

CAMPIONI	Lato [cm]	Spessore [mm]	d [g/cm ³]	ΔT [°C]	λ [W/mK]
RIF	4	40	1,39	-	0,166
C-L	30	34	1,28	9,43	0,110
C-UNI-T1	30	37	1,4	9,42	0,123

Tabella 12 - Valori medi risultanti dalla prova di conducibilità termica

Con il substrato C, la finitura UNI (C+UNI) conferisce una conducibilità termica pressoché invariata (+3.5%) rispetto a quella del sistema commerciale (C+L). Comunque sia, l'effetto della finitura innovativa sulla conducibilità termica del sistema, come aspettato, non risulta essere particolarmente significativa a causa dell'esiguo spessore di applicazione. Mentre il riferimento di Senff et al. registra una conducibilità molto più alta: +50% rispetto a C-L e +35% rispetto al provino C-UNI-T1. Inoltre, è da notare che i provini presentano spessori eterogenei tra di loro e per il calcolo del coefficiente di conducibilità termica, come si può notare dall'equazione precedente, all'aumentare dello spessore del provino, aumenta anche il coefficiente λ . Altro aspetto che influenza la conducibilità termica è la densità del materiale: i materiali più leggeri hanno prestazioni isolanti migliori.

Permeabilità al vapor d'acqua

La permeabilità al vapore di acqua (δ_p) misura la quantità di vapore d'acqua che attraversa, per unità di tempo, un'unità di superficie del materiale, per un campione di spessore unitario, quando c'è una differenza di pressione di vapore unitaria. Una buona permeabilità al vapore d'acqua di intonaci e finiture per applicazioni indoor è auspicabile in modo da permettere lo smaltimento dell'umidità, principale fonte di crescita di muffe, a garanzia di un ambiente più confortevole salubre. Il Fattore di Resistenza al vapore di acqua $\mu = \delta_{\text{aria}} (\text{permeabilità al vapore di acqua dell'aria}) / \delta_{\text{prodotto}} (\text{permeabilità al vapore di acqua del prodotto})$ è adimensionale e indica quante volte è maggiore la resistenza alla diffusione del vapore di acqua di un prodotto rispetto ad un volume di aria di uguale spessore (per l'aria $\mu = 1$). Per la determinazione della permeabilità in condizioni di flusso stazionario per condizioni di elevate umidità si è fatto riferimento alla normativa UNI EN 1015 - 19: 2008 "Metodi di prova per malte per opere murarie - Determinazione della permeabilità al vapore d'acqua delle malte da intonaco indurite" specifica un metodo. I dati sono stati elaborati mediante la norma UNI EN 12572: 2006 "Prestazione igrotermica dei materiali e dei prodotti per l'edilizia - Determinazione delle proprietà di trasmissione del vapore d'acqua" con la quale si determina la permeanza igroscopica di prodotti edilizi in condizioni isoterme.

I μ medi calcolati per i diversi provini possono essere confrontati nel seguente grafico ma non sono stati confrontati con un riferimento come le altre prove, poiché non si hanno dati in merito alla resistenza igroscopica per i campioni tratti dalla letteratura:

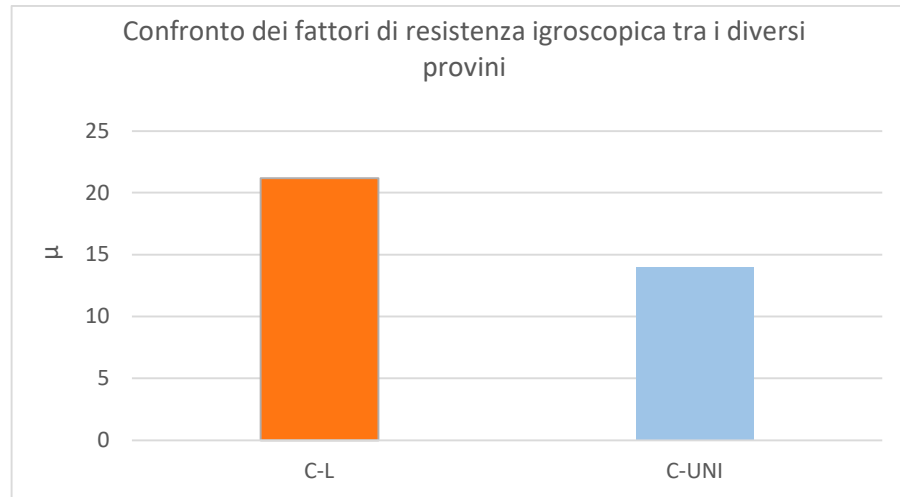


Grafico 11- Confronto dei fattori di resistenza igroscopica tra i diversi provini

Si può notare che la finitura L aumenta la resistività al vapor d'acqua del sistema rispetto al provino di sola calce di sottofondo. La finitura C-UNI-T1 invece ha una permeabilità più elevata. Si conclude che la finitura brevettata è più traspirabile rispetto alle finiture commerciali. Dai riferimenti presi dalla letteratura non si hanno valori di riferimento riguardo al parametro μ .

Moisture Buffery Value (MBV)

L'umidità interna influisce notevolmente sulla qualità dell'aria di un ambiente confinato, poiché valori troppo elevati o troppo bassi possono essere causa di danni per la salute umana, come asma e allergie. L'umidità interna può presentare variazioni quotidiane o stagionali. La capacità di tampone igroscopico di un materiale permette di moderare le oscillazioni di umidità relativa in uno spazio indoor aiutando a ridurre il fenomeno della condensa nell'involucro edilizio e a mantenere la salubrità dell'aria. Inoltre, la capacità di tampone igroscopico di malte e finiture per applicazioni può ridurre il consumo di energia degli edifici. Il progetto NORDTEST ha definito un metodo per determinare il Moisture Buffering Value (MBV) di materiali in ambienti indoor. L'MBV definisce l'umidità assorbita e desorbita dal materiale su unità di superficie quando esso viene a trovarsi in un ambiente caratterizzato da un'umidità relativa del 75% per 8 ore e 33% per 16 ore. Per ogni tipologia di provino (C-L e C-UNI-T1) è stato ottenuto il valor medio di

MBV calcolato, considerando per ogni campione la media dell'MBV calcolato su 3 cicli. Il grafico seguente riporta le variazioni di massa per unità di superficie di tutti i campioni testati e confrontati con i valori del campione di riferimento tratto dalla letteratura. (Senff et al. 2018)

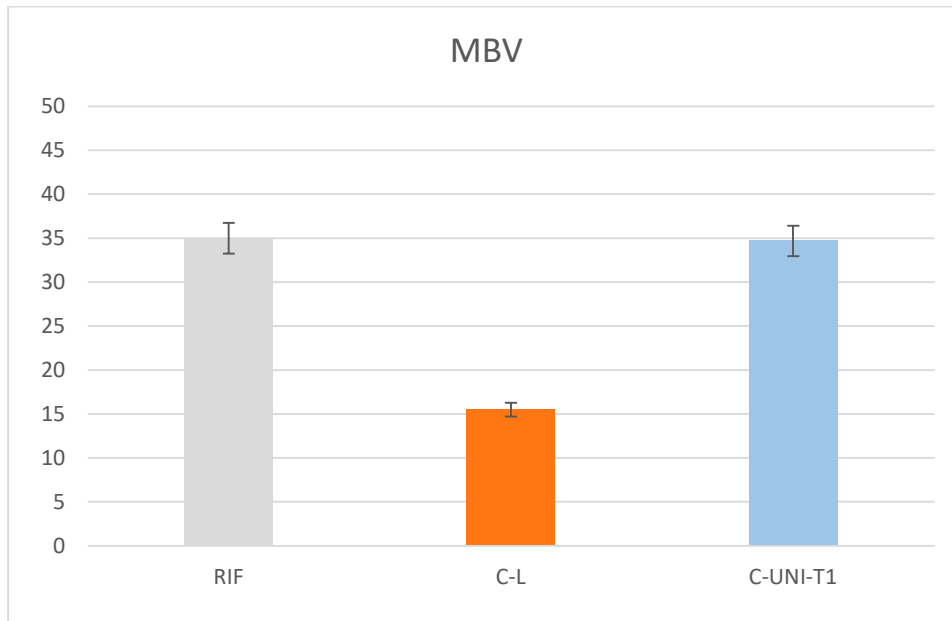


Grafico 12- MBV medio calcolato dei diversi provini

Dai risultati si osserva che l'applicazione della finitura L su C penalizza significativamente il MBV sul substrato C. Invece la finitura UNIVPM non solo non riduce la capacità di tampone igrometrico del substrato ma addirittura la incrementa. Rispetto alla letteratura invece non vi sono molti miglioramenti in quanto il provino testato da Senff e al. raggiunge circa il 35% di MBV. Pertanto, la finitura C-UNI-T1 che registra un 34,5% si posiziona come il campione RIF che ha contenuti % di TiO_2 e cellulosa simili.

4. Metodi di prova in laboratorio

Le prove in laboratorio hanno avuto il duplice obiettivo di validare il corretto funzionamento dei sensori Aeroqual, Series 900 che effettuano un monitoraggio continuo dei parametri di VOC presenti all'interno dei due ambienti, e delle lampade UV utilizzate successivamente per il test dell'azione fotocatalitica su scala pilota:

Test di laboratorio con sensori

Prima dell'installazione nei box, i sensori sono stati testati presso i laboratori dell'università in una camera climatica di prova con dimensioni 1 m x 1 m x 1 m. La calibrazione degli strumenti è stata effettuata per garantire misurazioni affidabili e trarre conclusioni significative dallo studio. Lo scopo è stato quello di verificare che i sensori, collocati nel medesimo ambiente (stessi parametri microclimatici e stessa quantità di inquinante), fornissero valori (in ppm) coincidenti o con una differenza ammissibile inclusa nel range fornito dai certificati di calibrazione compilati dall'azienda produttrice.



Figura 31 - Allestimento camera climatica

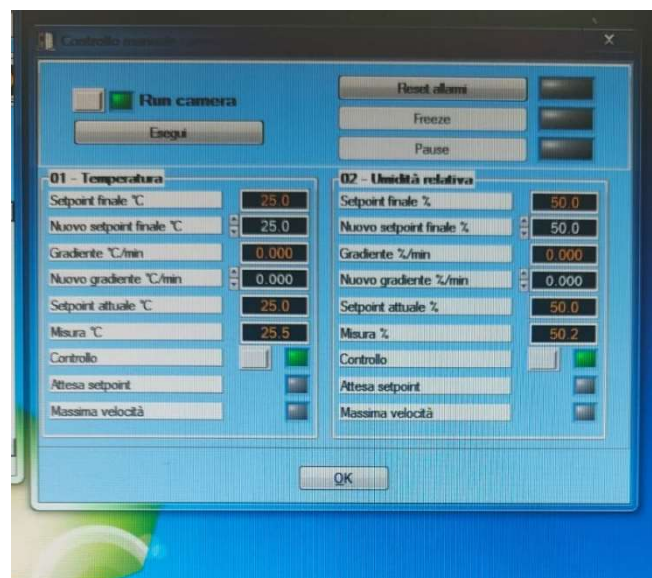


Figura 32 - Controllo temperatura e umidità



Figura 33 - Materiale per le iniezioni

I dati della camera climatica e delle condizioni ambientali sono i seguenti:

DATA		
chamber volume	1201.00	L
density VOC (MEK)	0.80	g/cm ³
Concentration (MEK)	0.22	mg/m ³
Concentration (MEK)	222.22	µg/m ³
MM	72.11	g/mol
MM	24.40	
T ambientale	25.00	°C
UR ambientale	50.00	%

Tabella 103 - Caratteristiche camera climatica

L'equivalenza tra valori in ppm e µL del quantitativo di inquinante è stato calcolato con le seguenti equazione, in cui il volume di inquinante in µL è stato moltiplicato per la densità del Metil Etil Chetone e poi diviso per il volume della camera, per poterne ottenere la concentrazione in $\frac{mg}{m^3}$.

$$C = \frac{V_{MEK} \cdot d}{V_{box}} \cdot 1000$$

Per convertire la concentrazione da $\frac{mg}{m^3}$ a ppm, si è operato in questo modo:

$$\frac{C \left[\frac{mg}{m^3} \right] \cdot MM}{mol \cdot MM \left[\frac{g}{mol} \right]} = [ppm]$$

Questi passaggi di calcolo sono stati utilizzati per calcolare il valore in ppm del carico teorico di MEK (tabella 8), da confrontare con le misure successivamente rilevate dai sensori.

La prova si è svolta su più giorni. Per confrontare l'andamento delle misurazioni effettuate dai sensori, la prova è stata effettuata su più punti, ciascuno caratterizzato da un carico di MEK crescente. La prova è stata ripetuta due volte per validarne il risultato. In particolare, la procedura è stata effettuata inserendo i sensori nella camera climatica disposti sulla griglia della stessa parallelamente alla posizione di una piastra di Petri disposta sul pavimento della camera. La piastra è servita come contenitore per i carichi spot dell'inquinante iniettato mediante una siringa da 100 μ L. I carichi sono stati effettuati con rapidità per evitare che il composto volatile uscisse attraverso il portellone aperto della camera. La diffusione omogenea dell'inquinante all'interno della camera è stata facilitata dalla presenza di una ventola interna alla stessa che ha la funzione rendere il flusso uniforme in ogni punto. Inoltre, ciascuna prova di carico è stata effettuata in giorni differenti. Dopo ogni carico, per riportare i valori allo zero prima di una prova successiva, nella camera è stata posizionata una modesta quantità di carbone attivo in granuli con funzione assorbente nei confronti dei composti volatili e precedentemente ricotto al forno per pulirlo da impurità e per migliorarne quindi l'efficacia.



Figura 34 - Carbone attivo in granuli

Di seguito si riportano le misure dei valori di picco in ppm rilevate ad ogni carico crescente di inquinante. La scelta del solo valore di picco anziché di un numero più elevato di misure per valutare la coerente sensibilità dei sensori è data dal fatto che la camera climatica non è un ambiente perfettamente ermetico e ciò è confermato dal trend decrescente dei valori subito dopo il valore di picco (curva decrescente del grafico). Si riporta un grafico d'esempio ottenute in una delle sei prove di carico di inquinante.

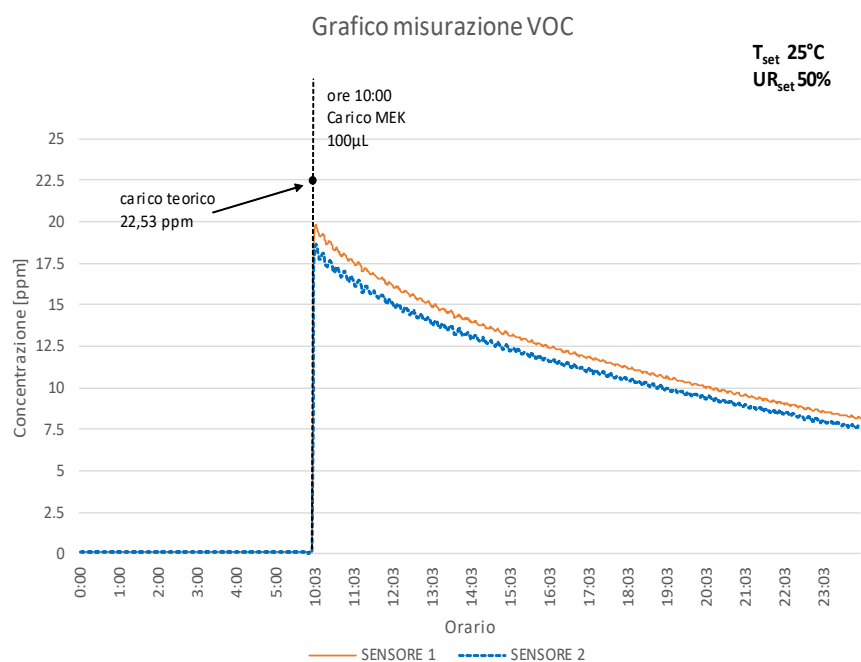


Grafico 13 - Grafico d'esempio della misurazione VOC nella camera climatica con carico 100 µL

La tabella seguente riporta i valori di picco di tutti i carichi di MEK di entrambe le prove eseguite nelle medesime condizioni ambientali. È possibile confrontare il valore atteso "*theoretical loads*" con i valori rilevati caratterizzati da valore attendibile ed errore.

	LOADS		PROVA 1			
	MEK loads	Theoretical loads	sensor 1	error	sensor 2	error
	[μ L]	[ppm]	[ppm]	[ppm]	[ppm]	[ppm]
blanck	0	0.00	0.06	0.02	0.06	0.02
load 1	25	5.63	4.17	0.43	4.15	0.43
load 2	50	11.27	9.56	0.97	9.41	0.95
load 3	100	22.54	19.42	1.95	18.85	1.90
	LOADS		PROVA 2			
	MEK loads	Theoretical loads	sensor 1	error	sensor 2	error
	[μ L]	[ppm]	[ppm]	[ppm]	[ppm]	[ppm]
blanck	0	0.00	0.08	0.02	0.08	0.02
load 1	25	5.63	4.48	0.46	4.12	0.42
load 2	50	11.27	9.62	0.97	9.10	0.92
load 3	100	22.54	19.80	1.99	18.63	1.87

Tabella 114 - Valori di picco teorici e misurati

Per visualizzare ancor meglio l'andamento lineare e soprattutto accettabile dei valori monitorati dai sensori, i dati, teorici e misurati, della tabella precedente sono stati graficati, rappresentandone puntualmente il valore numerico e il range di errore. La linea di tendenza dei valori teorici è quella in nero. In rosa e in giallo abbiamo l'andamento del sensore 1 rispettivamente nella prima e nella seconda prova, in azzurro e verde l'andamento del sensore 2.

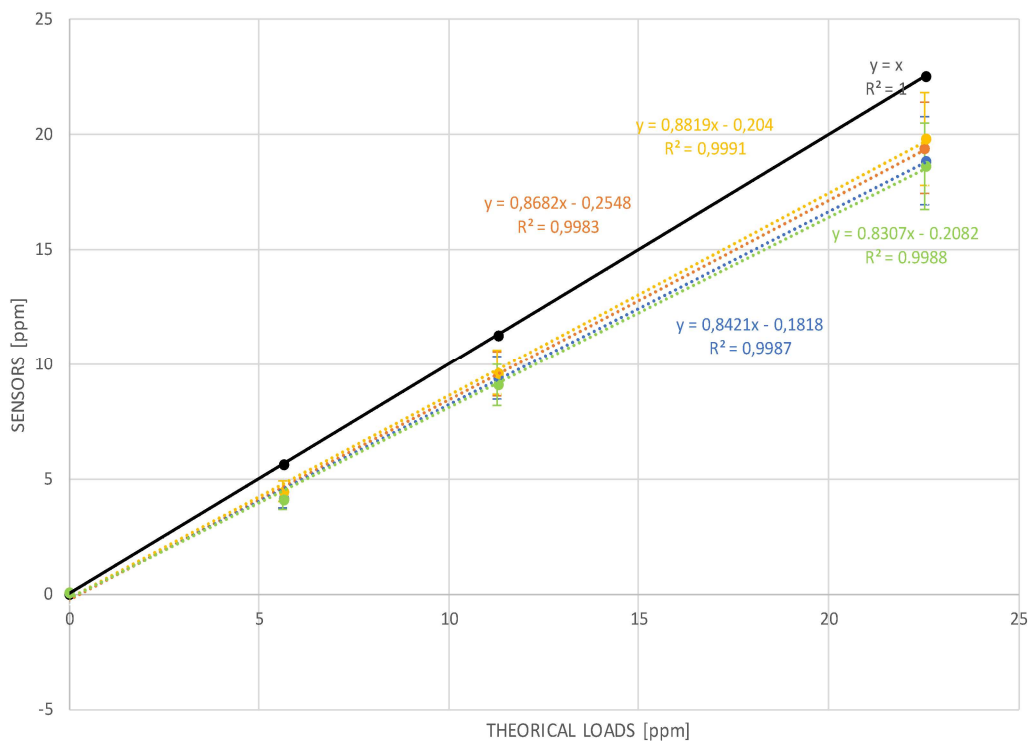


Grafico 14- Linee di tendenza dei carichi teorici e misurati

Dalla prova si osserva che i sensori hanno un andamento pressoché lineare che segue la linea di tendenza (nera) di riferimento. Inoltre, si dimostra che i valori rientrano nel range ammesso per l'accuratezza del fattore di calibrazione ovvero $< \pm 0.02 \text{ ppm} + 10\%$ della misura rilevata (Aeroqual). In tutti i casi i valori sono accettabili.

Test di laboratorio con lampade UV 100W

Il test di laboratorio con le lampade UV 100W è servito per testare il corretto funzionamento delle lampade e l'effetto fotocatalitico dei provini UNIVPM. Per il funzionamento delle lampade ci si è serviti di un foto-radiometro (Luxmetro datalogger portatile della DeltaOhm per la misurazione di illuminamento, luminanza, PAR, irradiazione) con sonde scambiabili per misurare a distanze opportune il valore di irradianza emessa dalla lampada nel campo del visibile e nello spettro UV. La distanza è stata misurata tra la superficie emittente della

lampadina rivolta verso il basso e la superficie superiore della sonda, comprensiva dello spessore del cilindro in vetro.



Figura 35- Foto-radiometro DeltaOhm

La prova è stata condotta inserendo le sonde, una alla volta, all'interno del cilindro di vetro aperto compreso nel sistema di monitoraggio degli NOx che verrà descritto dettagliatamente più avanti. La lampadina UV alogena ai vapori di mercurio, Reptech (a spettro completo UVA + UVB + calore) è stata montata su un'asta ad altezza regolabile. Lampada e sonda sono state poste perfettamente in asse (vedi figura38), così da assicurare il valore corretto dell'irradianza rilevata.



Figura 36 - Lampada UV Reptech

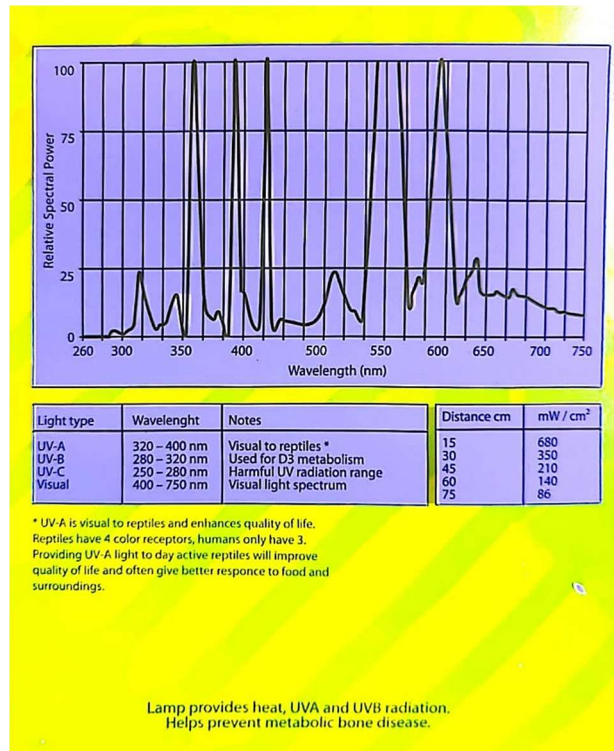


Figura 37 - Spettro di emissione delle lampade Reptech



Figura 38 - Allestimento per la misurazione dell'irradianza

Si è scelto di misurare l'irradianza a due distanze differenti: 20 cm e 50 cm, facilmente riproducibili anche al laboratorio POND. Nella situazione più vicina, l'irradianza rilevata nel visibile è di 72,5 W/m² e nell'ultravioletto è di 20,19

W/m^2 , mentre alla distanza di 50 cm le misure rilevate sono rispettivamente $12,2 W/m^2$ e $2,7 W/m^2$. Questi valori più o meno bassi saranno responsabili del maggiore o minore effetto fotocatalitico nei confronti degli NO_x .

Per quanto riguarda la caratterizzazione fotocatalitica, l'apparato e le condizioni di prova sono quelli suggeriti dalla norma UNI 11247, metodologia diretta a valutare l'indice di abbattimento fotocatalitico degli ossidi di azoto NO_x ($NO+NO_2$) presenti nel gas sorgente, dovuta all'azione di materiali inorganici dispersi in matrici cementizie o ceramiche. La norma usa un flusso continuo per la determinazione della degradazione degli ossidi di azoto nell'aria ad opera di materiali fotocatalitici inorganici. Il flusso di NO_x all'interno del reattore, fornito da un serbatoio (499 ppb NO) (SAPIO Srl, Monza, Italia), è mantenuto costante da un sistema di diluizione (Calibrator 8188, Rancon Instruments spa, Milano, Italia) che usa aria atmosferica a $T = 27 \pm 2^\circ C$ e $UR = 45 \pm 5\%$. I campioni in esame sono posizionati internamente al centro di un reattore, costituito da un cilindro in vetro Pyrex da 3L. Per la caratterizzazione fotocatalitica nell'UV, il campione è stato irraggiato dall'esterno con una Lampada UV alogena ai vapori di mercurio da 100W, a spettro completo UVA e UVB, con un'irradianza misurata sulla superficie del campione secondo le modalità viste in precedenza.



Figura 39- Provino della finitura UNIT1



Figura 40- Sistema di diluizione Rancon



Figura 41- Allestimento per la misurazione dell'effetto fotocatalitico

I dati rilevati in due prove differenti, ciascuna per le due distanze scelte (20 cm e 50 cm) sono stati graficati.

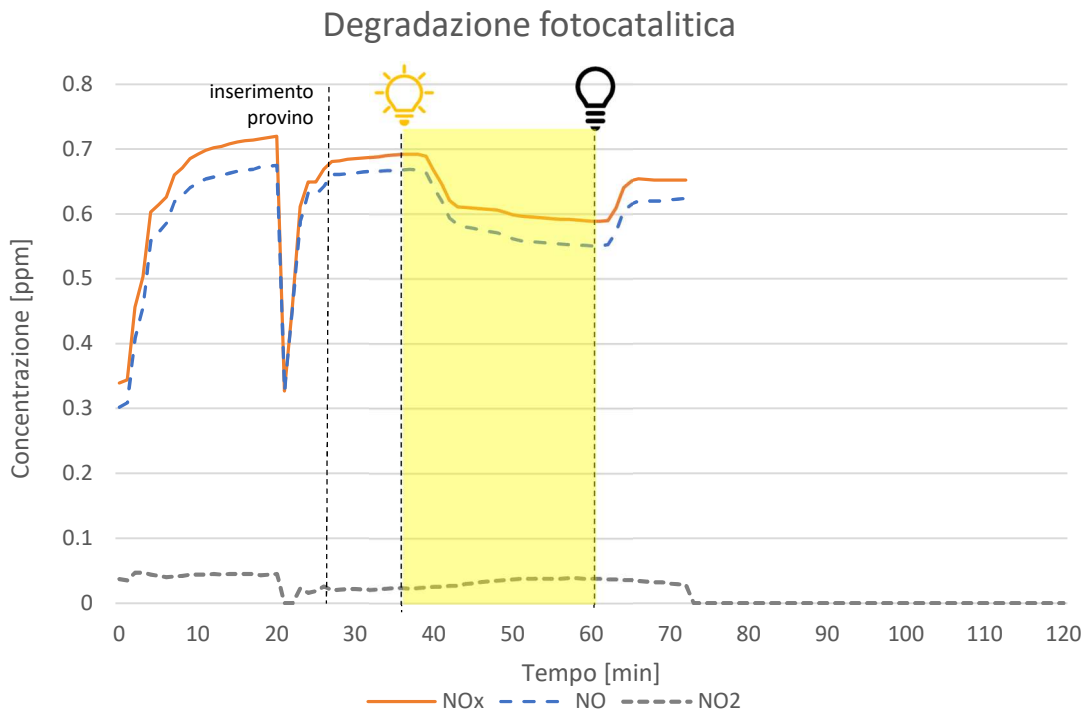


Grafico 15- Grafico dell'effetto fotocatalitico del provino C-UNI-T1 a una distanza di 20 cm con lampada UV 100W irradianza 20W/m² nell'UV e 72,5W/m² nel VISIBILE

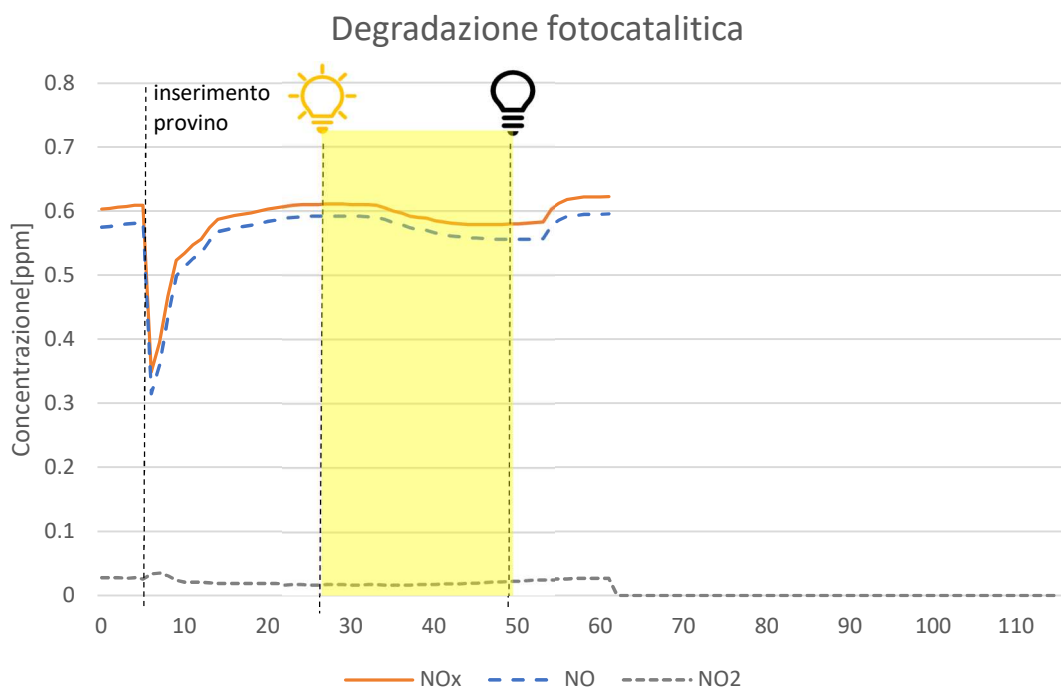


Grafico 16 - Grafico dell'effetto fotocatalitico del provino C-UNI-T1 a una distanza di 20 cm con lampada UV 100W irradianza 2,7W/m² nell'UV e 12,2W/m² nel VISIBILE

L'attività fotocatalitica di abbattimento degli ossidi di azoto (NO_x) è espressa come indice adimensionale di abbattimento fotocatalitico A_c . L'indice adimensionale di abbattimento si riferisce solo e soltanto alle condizioni di prova riportate nella norma UNI11247 ed è ottenuto con la seguente formula.

$$A_c = 100 \cdot \frac{C_B - C_L}{C_B} \cdot \frac{I_N}{I} \cdot \frac{S_N}{S}$$

Equazione 1- Formula per calcolo indice di abbattimento fotocatalitico UNI11247

Dove:

A_c = Indice adimensionale di abbattimento nelle condizioni di prova (%)

C_B = Concentrazione di NO_x in uscita dal reattore al buio (ppb)

C_L = Concentrazione di NO_x in uscita dal reattore irradiato (ppb)

I = Irradianza media misurata ed eventualmente corretta (W/m^2)

I_N = Irradianza nominale ($20 \text{ W}/\text{m}^2$)

S = Area del campione misurata (cm^2)

S_N = Area nominale del campione (64 cm^2)

Nella tabella vengono raccolti i dati ottenuti applicando la formula dell'*equazione 1* ad entrambe le prove eseguite:

Distanza [cm]	Irradianza [W/m^2]	Abbattimento fotocatalitico
20 cm	20	13,3%
50 cm	2,7	1,8%

Tabella 12 - Risultati della prova di abbattimento fotocatalitico in laboratorio

5. Metodi di monitoraggio in sito

5.1. Test room

Lo scopo di tale sperimentazione è appunto quella di allestire un campo prova (POND) che possa simulare le caratteristiche di un ambiente indoor, dopo aver effettuato opportune prove di monitoraggio in laboratorio.

Il campo prova è situato in Via Ferruccio Fioretti n. 28, Ancona (AN). Si trova alle coordinate geografiche 43°32'13.8"N 13°30'56.0"E.

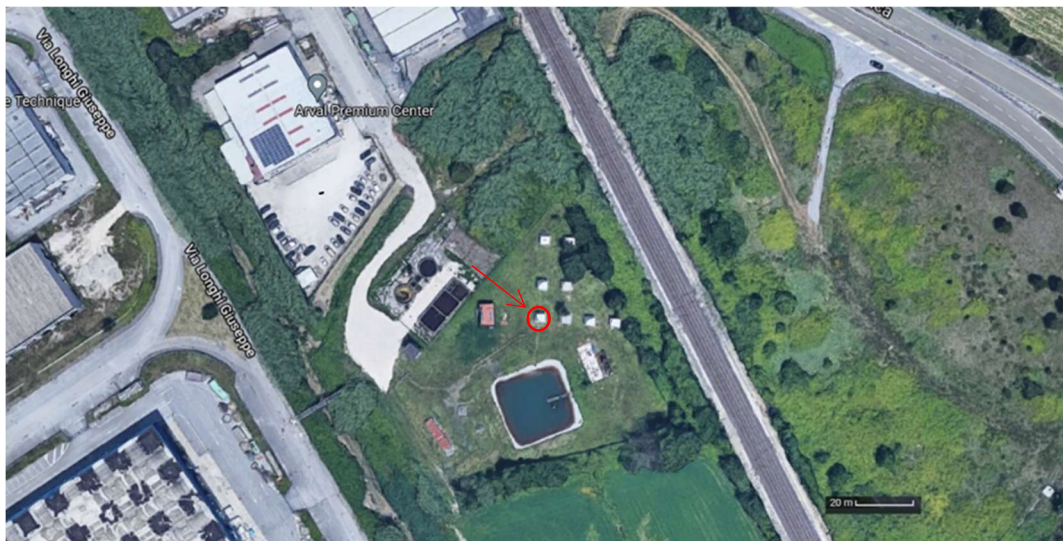


Figura 36 - Planimetria campo prova

La campagna sperimentale ha riguardo una serie di prove in diverse condizioni d'uso su un box prefabbricato di dimensioni circa 3m x 3m x 3m caratterizzato da involucro in pannelli sandwich in alluminio con strato interno in lana minerale dello spessore di 12 cm. Esternamente, sui lati nord est e ovest, è presente un ulteriore strato di coibentazione a cappotto in polistirolo di 10 cm con finitura in alluminio, che conferiscono alle pareti uno spessore totale di 22cm. Sul lato sud, invece, lo spessore dell'isolante è di 12 cm ed esternamente, al posto della finitura in alluminio è stato inserito un pannello in acquapanel, raggiungendo uno spessore totale di 15 cm. Internamente, in tutte le pareti, è presente un pannello in cartongesso. Le finiture oggetto di studio sono state installate sul lato interno della parete sud. Il basamento è una platea in calcestruzzo armato di circa 40 cm.



Figura 37 - Prefabbricato oggetto di studio

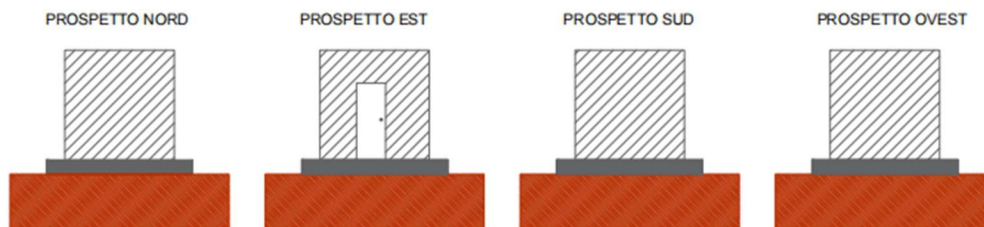


Figura 38- Prospetti del prefabbricato oggetto di studio

La parete da sottoporre alle prove, esposta a sud, è costituita, procedendo dall'esterno verso l'interno, da una parete esistente su cui successivamente è stato posizionato uno strato di calce storica di 2cm. La calce Storica è una malta monocomponente premiscelata a base di calce idraulica naturale NHL 5, completamente priva di cemento, caratterizzata da ottime resistenze meccaniche ed elevata adesione al supporto.

Il campo prova è poi diviso in due sezioni uguali, di dimensioni di 1,2m x 1,2m x 2,9m, attraverso un divisorio in cartongesso isolante per poter ricavare un'anticamera che ospiti il sistema di monitoraggio. Inoltre, vi è un'ulteriore separazione delle due sezioni di prova dal resto della stanza. Nella sezione a destra della *figura 54* è stata collocata la finitura UNIVPMT1 di 3mm, che verrà applicata in 2 strati consecutivi di circa 1,5 mm ciascuno. In particolare, prima verrà applicato uno strato senza additivo TiO_2 , poi uno strato più superficiale

in cui è presente l'additivo TiO_2 , che risulta essere un catalizzatore molto efficace per la degradazione mediante ossidazione dei composti inquinanti. Mentre nella sezione a destra della *figura 54* è stato collocato il pacchetto di riferimento proposto dalla DIASEN, che risulta essere formato da un D20 fissativo e da lime-paint. La lime-paint è un'idropittura liquida, altamente coprente e traspirante, a base calce, da utilizzare come finitura per pareti e soffitti all'interno.

All'interno del campo prova si trovano, per entrambe le sezioni:

- una lampada ultravioletta LUX (Osram) di 300W, posizionata a 1,5 m da terra, che serve per simulare lo spettro solare;
- una lampada UV Reptech di 100W su asta autoportante ad una altezza di 1,3 m e distante 60 cm dalla parete con la finitura;
- una sorgente VOC, costituita dal microinquinante MEK;
- un umidificatore, posto a terra, per mantenere l'ambiente ad una umidità relativa stabile;
- un flussimetro utilizzato per misurare il flusso o la portata di massa per gas;
- una sonda per il monitoraggio dei parametri di temperatura e umidità relativa, posta a 1,8 m da terra;
- una sonda per rilevare la concentrazione di VOC all'interno del box, posto a terra.

All'interno di ciascuna sezione dove sono applicate le due finiture sono installate inoltre una sonda per misurare la temperatura superficiale del box 1 (RTD1), dove è applicata la finitura UNIVPM, e una sonda per misurare la temperatura superficiale del box 2 (RTD2), dove è applicata la finitura della DIASEN.

All'esterno dei due box, nello spazio di servizio, è presente invece un deumidificatore per abbassare l'umidità relativa quando supera determinati livelli (50%), un termoconvettore per mantenere la temperatura stabile all'interno del box, un termostato per la regolazione della temperatura, una sonda per il rilevamento della temperatura ed umidità relativa ambientale.

È inoltre presente una stazione di monitoraggio rappresentata da un sistema di acquisizione dati, mediante computer.

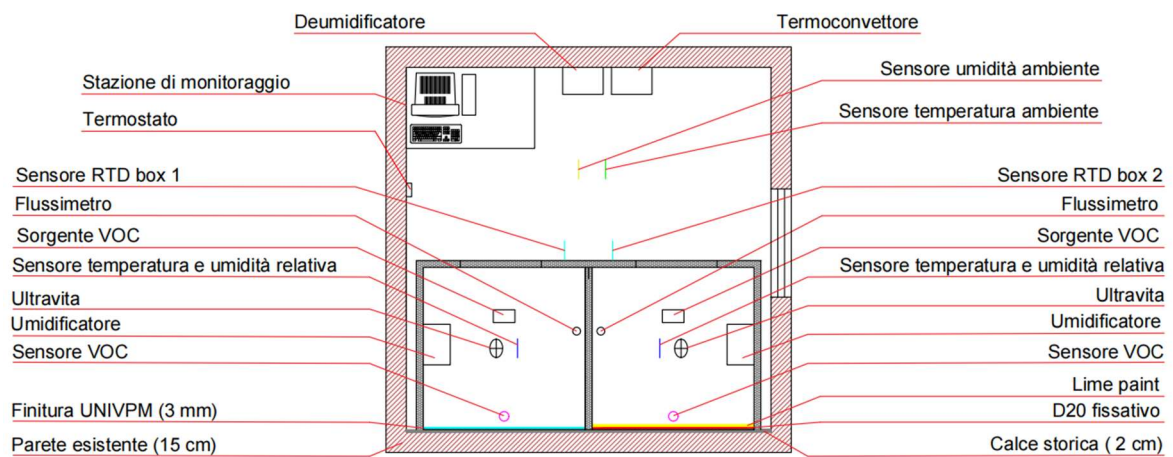


Figura 39- Planimetria POND

Per quanto riguarda la realizzazione della parete da sottoporre alla sperimentazione, viene illustrato di seguito il procedimento.

Per prima cosa, è stato applicato il sottofondo di calce storica su tutta la parete sud.



Figura 46 - Applicazione calce storica 1° strato



Figura 47 - Applicazione calce 2° strato

Successivamente alla stesa del sottofondo di calce storica, sono state applicate le due finiture oggetto di studio. Nella metà di destra è stata stesa la finitura realizzata dall'UNIVPM, mentre nella metà di sinistra verrà stesa la finitura commerciale della DIASEN.



Figura 48- Applicazione finiture



Figura 49- Applicazione finiture

Il passaggio successivo è stato quello di dividere il POND in due locali di circa 4m³, per distinguere le due tipologie di finiture, mediante l'utilizzo di pannelli in cartongesso. I due ambienti, dopo essere stati allestiti, sono stati separati dalla zona di monitoraggio per evitare che ci siano interferenze durante lo svolgimento della prova. È stata realizzata un'apertura per ogni box di dimensioni 60x60 cm per poter aver accesso all'interno. Durante lo svolgimento della prova vengono chiuse mediante pannelli in cartongesso e sigillati con nastro adesivo.

Infine, all'esterno dei due box, è stato allestito un sistema di monitoraggio.



Figura 50- Realizzazione box di monitoraggio



Figura 51- Chiusura box



Figura 52- Allestimento sistema monitoraggio

5.2. Strumentazione

Per quanto riguarda il monitoraggio in sito, il sistema di acquisizione dati non è rappresentato da un dataTaker bensì da un software chiamato LabVIEW utilizzato per la progettazione di sistemi e pensato appositamente per lo sviluppo di applicazioni di test, misura e controllo con accesso rapido all'hardware e ai risultati.

Per il monitoraggio dei VOC sono stati utilizzati due sensori, uno per ogni box, posizionati a terra e prodotti dall'azienda Aeroqual, modello Series 900. Questi permettono di effettuare un monitoraggio continuo dei parametri di VOC presenti all'interno dei due ambienti.



Figura 53- Sensore VOC Aeroqual Series 900

Per il monitoraggio della temperatura e umidità relativa è stato utilizzato un sensore sonda. In particolare, sono stati utilizzati i PCMini52 dell'azienda Michell. Questi possono operare con un range di temperatura di $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$, mentre per l'umidità relativa in un range di 0-100%.

Il trasmettitore di dimensioni ridotte fornisce due uscite analogiche configurabili a scelta tra temperatura, umidità relativa, dew point o umidità assoluta. Nel nostro caso sono state configurate con temperatura e umidità relativa.

Per le sonde superficiali sono state utilizzate le PT100.

Le termo-resistenze PT100 (comunemente chiamate "sonde PT100") sono elementi termosensibili adatti a misurare la temperatura considerata la loro particolare sensibilità, precisione e affidabilità. Disponibili in qualsiasi forma, dimensione e materiale, le sonde PT100 vengono comunemente applicate in

tutti quei campi applicativi nei quali la temperatura massima di lavoro sia ≤ 650 °C.

Il principio di funzionamento dei PT100 è di misurare la resistenza dell'elemento di platino. La differenza di un solo grado provoca la variazione di resistenza di $0,384 \Omega$ (Ohm), quindi un minimo errore nella rilevazione della temperatura, può provocare errori di larga scala. [20]



Figura 54- Sensore PCMini52



Figura 55- Sensore PT100

All'interno dei box sono poi presenti gli umidificatori che hanno lo scopo di regolare il tasso di umidità degli ambienti chiusi tramite delle emissioni di vapore. Sono stati utilizzati gli umidificatori UHW della Medisana. La tecnologia ad ultrasuoni a basso rumore e a risparmio energetico dell'umidificatore trasforma l'acqua nella nebbia più fine attraverso le vibrazioni, aumentando il livello di umidità dell'aria. [14]



Figura 56-Umidificatore e UHW Medisana

Inoltre, ai fini del monitoraggio è stato necessario inserire un termoconvettore nello spazio di servizio all'esterno delle due parti allestite per il monitoraggio della finitura per mantenere la temperatura costante, un deumidificatore per far abbassare il livello di umidità relativa nel caso in caso di bisogno ed una sorgente di VOC rappresentata dal microinquinante MetilEtilChetone.



Figura 57 - Confezione Metil Etil Chetone

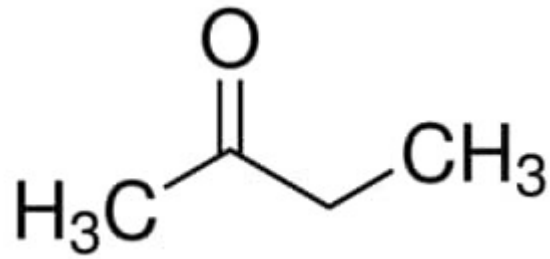


Figura 58- Formula chimica Metil Etil Chetone

Per simulare lo spettro solare sono state utilizzate lampade a diversa potenza:

- lampada ultravioletta LUX (Osram) di 300W, posizionata a 1,5 m da terra, che serve per simulare lo spettro solare solo in termini di UVA e UVB e nel VISIBILE;

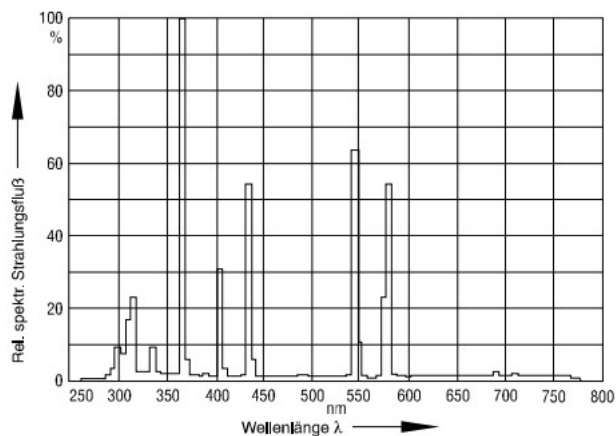


Grafico 17 - Spettro di emissione della Lampada Osram 300W

- una lampada UV Reptech di 100W su asta autoportante ad una altezza di 1,3 m ma a distanza variabile dalla parete con la finitura a seconda delle prove. Questa lampada ai vapori di mercurio (MVL) emette radiazioni calde (IR), sia UVA che UVB, oltre alla luce visiva. Di seguito viene presentato il grafico che esprime in percentuale il potere emissivo della lampada Reptech in funzione della lunghezza d'onda della radiazione di riferimento.

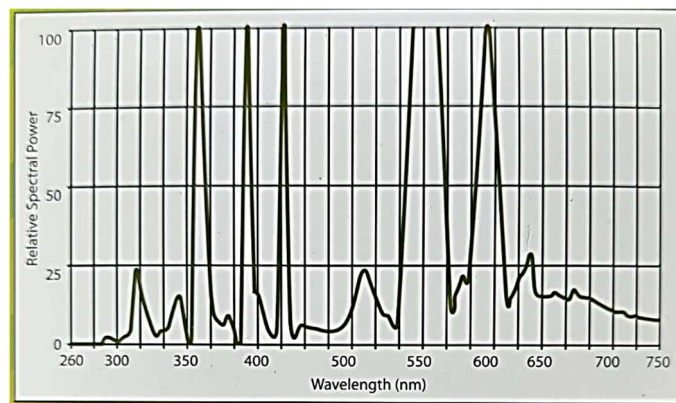


Grafico 18- Spettro di emissione della Lampada Reptech 100W

Dal grafico si evince che questo tipo di lampada ha elevata potenza emissiva nel campo del visibile e nell'ultravioletto, particolarmente per UVA e UVB:

- visibile 400-750 nm
- UVA 320-400 nm
- UVB 280-320 nm
- UVC 250-280 nm

Dopo aver calibrato i sensori e dopo averli collegati al sistema di acquisizione, è stato automatizzata la metodologia di test, rendendola indipendente dall'operato umano, permettendo di realizzare un numero maggiore di prove consecutive e con scansioni temporali più precise. Per l'acquisizione dei parametri di funzionamento, concentrazione VOC, temperatura e umidità relativa, si utilizza il programma di calcolo "labVIEW". Il campionamento per l'acquisizione dei dati è stato impostato con un intervallo di registrazione di 7 secondi, così da ottenere risultati più dettagliati. I risultati di concentrazione di

VOC, della temperatura e dell'umidità relativa vengono forniti rispettivamente in ppm (parti per milione), °C e %. Di seguito vengono riportate le rappresentazioni dell'interfaccia del software utilizzato nella procedura automatica.

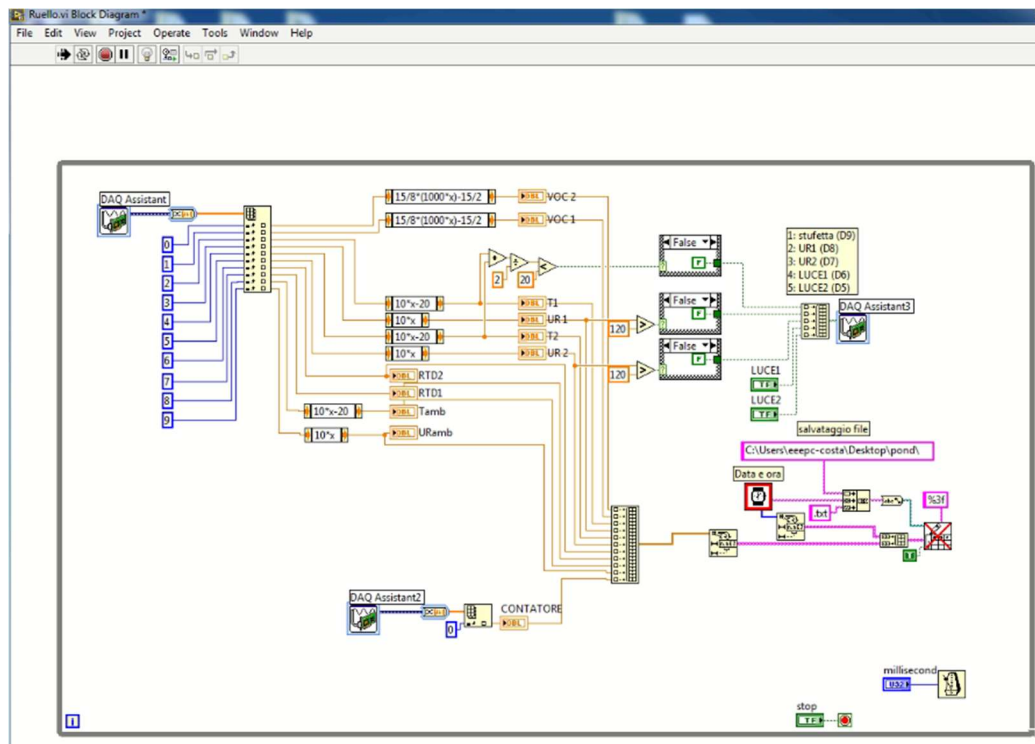


Figura 59- Interfaccia sistema di acquisizione dati

Il sistema ci fornisce un'acquisizione dei dati di concentrazione dei VOC rispettivamente all'interno del box 1 e box 2 (VOC 1, VOC 2), un'acquisizione dei parametri di temperatura all'interno dei box (T1, T2), sulla superficie dei box (RTD1, RTD2) e dell'ambiente esterno ai box (Tamb) e un'acquisizione dei parametri di umidità relativa all'interno dei box (UR1, UR2) e dell'ambiente esterno ai box (URamb).

Il funzionamento del sistema di monitoraggio è riportato nel seguente diagramma a blocchi:

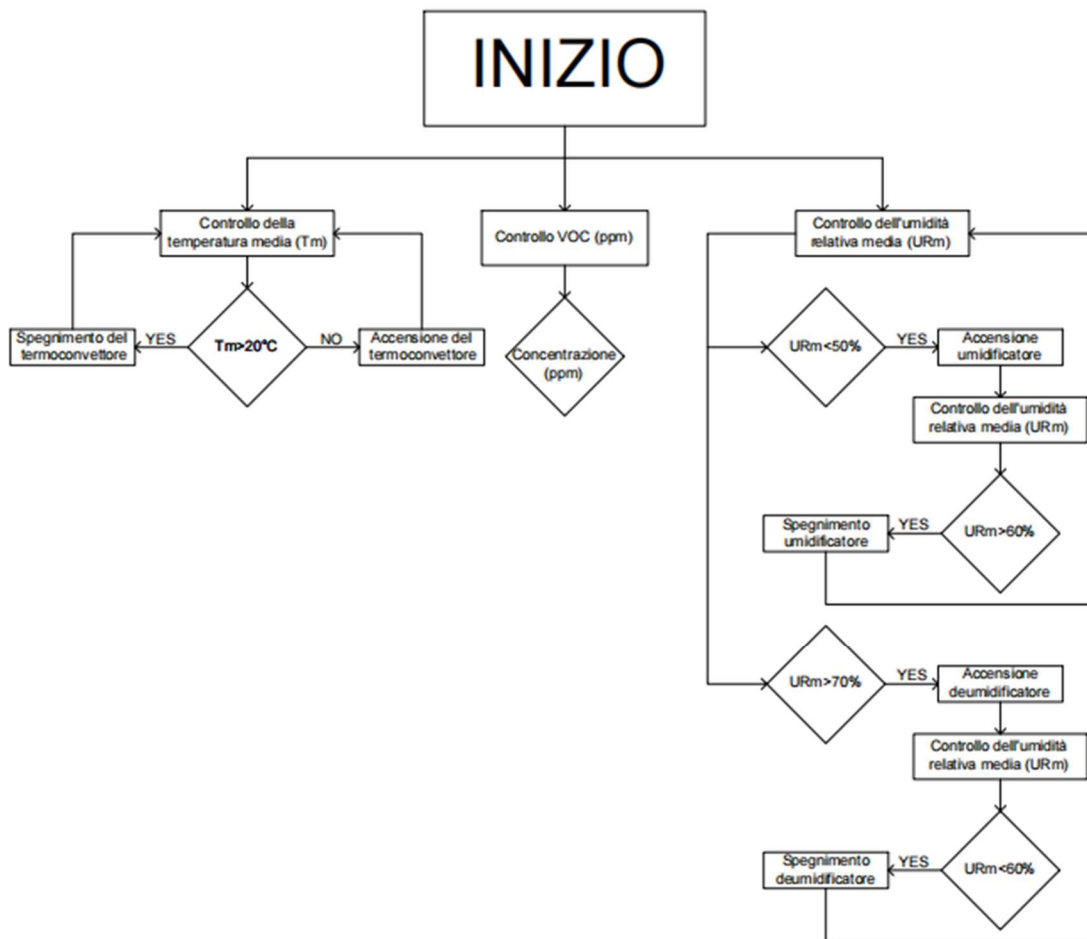


Figura 60- Diagramma a blocchi sistema di monitoraggio

Attraverso tale digramma è possibile definire il funzionamento del sistema. Per il controllo della temperatura media si fa riferimento alla temperatura nel box 1, con finitura UNIVPM e alla temperatura nel box 2, con finitura DIASEN. Viene fatta quindi la media fra la T1 (box 1) e T2 (box 2).

Quando la temperatura media è al di sotto dei 20°C, il sistema prevede l'accensione del termoconvettore per arrivare alla temperatura fissata, mentre se la temperatura media supera i 20°C, si ha lo spegnimento del termoconvettore per ristabilire la temperatura fissata.

Per quanto riguarda l'umidità relativa, viene, anche in questo caso, considerata la media fra l'umidità del box 1 (UR1) e quella del box 2 (UR2). Quando l'umidità relativa media è al di sotto del 50% si prevede l'accensione dell'umidificatore mentre quando supera il 60%, avviene il suo spegnimento.



Nel caso in cui l'umidità relativa dovesse eccedere il 70% si prevede l'accensione di un deumidificatore che si spegnerà quando l'umidità tornerà al di sotto del 60%.

A tale punto, una volta impostato il sistema con i relativi settaggi, è possibile cominciare la prova e procedere alla acquisizione dei dati. I dati verranno poi scaricati in remoto così da non interferire con lo svolgimento della sperimentazione.

6. Risultati

Le prove in sito sono state effettuate all'interno del box, prefabbricato di circa 27m³, diviso in tre ambienti: due di 4 m³ e uno di 19 m³ circa.

La prova in sito consiste nel mettere a confronto due tipologie di finiture, una prodotta dall'UNIVPM e una di tipo commerciale prodotta dalla DIASEN, mediante la realizzazione di due box di circa 4m³. Dopo aver allestito il POND, con sistema di monitoraggio e acquisizione dei parametri, si procede con la prova. All'interno dei box viene messo il microinquinante MEK in diverse modalità (carico spot o carico diffuso): esso rappresenta il composto organico volatile per i test disinquinanti. Vengono settati i sensori in modo tale da stabilire una temperatura all'interno dei box di 20°C mediante l'accensione e lo spegnimento di un termoconvettore e un'umidità compresa tra il 50% e 70% attraverso l'accensione e lo spegnimento di un umidificatore e di un deumidificatore. In alcuni test i valori climatici sono stati portati a valori di stress: 20% molto secco, 80% molto umido. Altre volte, per testare l'effetto fotocatalitico del TiO₂ sono state accese lampade UV.

Una volta iniziata la prova è possibile consultare e scaricare, anche da remoto, attraverso il software Anydesk, l'andamento dei parametri di concentrazione, umidità relativa e temperatura in tempo reale mediante l'utilizzo di un software "labVIEW" e tabellare/graficare i valori su fogli di lavoro Excell.

È stata quindi messa a punto una prova su più mesi, di cui sono stati scaricati da remoto, gli andamenti dei valori giornalmente. Nei grafici seguenti vengono illustrati gli andamenti dei parametri di concentrazione VOC, umidità relativa e temperatura. Con i valori "VOC1", "T1" e "UR1" si fa riferimento ai parametri registrati per il box 1, dove è presente la finitura UNIVPM, mentre con i valori "VOC2", "T2" e "UR2", si fa riferimento ai parametri registrati nel box 2, dove è presente la finitura della DIASEN. Con il parametro "RTD", ci si riferisce alla temperatura dell'anticamera.

L'acquisizione dati e l'attività di confronto sono iniziati un mese dopo l'applicazione delle finiture nel box. Le prove effettuate hanno riguardato

l'osservazione della risposta delle finiture rispetto a variazioni delle condizioni ambientali:

- aumento dell'inquinamento indoor effettuato con carico spot oppure con carico diffuso per testare l'effetto disinquinante senza contare sull'attivazione del TiO_2 ;
- riduzione dell'inquinamento indoor senza carico di MEK con accensione di lampade UV responsabili dell'attivazione dell'effetto fotocatalitico;
- aumento dell'umidità relativa interna mediante umidificatori inseriti nei box per valutare la capacità tampone delle malte;
- accensione delle lampade UV responsabili dell'effetto fotocatalitico e del surriscaldamento dell'ambiente dei box, effetti che sono stati studiati in combinazione.

In questo modo è stato possibile valutare l'effetto disinquinante delle malte, la capacità di assorbire umidità oppure le combinazioni di queste prestazioni e confrontarle in termini percentuali con i risultati ottenuti dalle prove in laboratorio.

6.1. Proprietà dis inquinante senza fotocatalisi

Inerzia interna senza carico d'inquinante

Nel grafico che segue viene rappresentato l'andamento della concentrazione dei VOC e della temperatura in un arco temporale di un'intera giornata. Con i valori "VOC MAMMUT", "T1", "RTD1" e "UR1" si fa riferimento ai parametri registrati per il box 1, dove è presente la finitura UNIVPM, mentre con i valori "VOC LIMEPAINT", "T2", "RTD2" e "UR2", si fa riferimento ai parametri registrati nel box 2, dove è presente la finitura LIMEPAINT della Diasen. La prova è stata realizzata senza l'immissione del microinquinante MEK all'interno dei box.

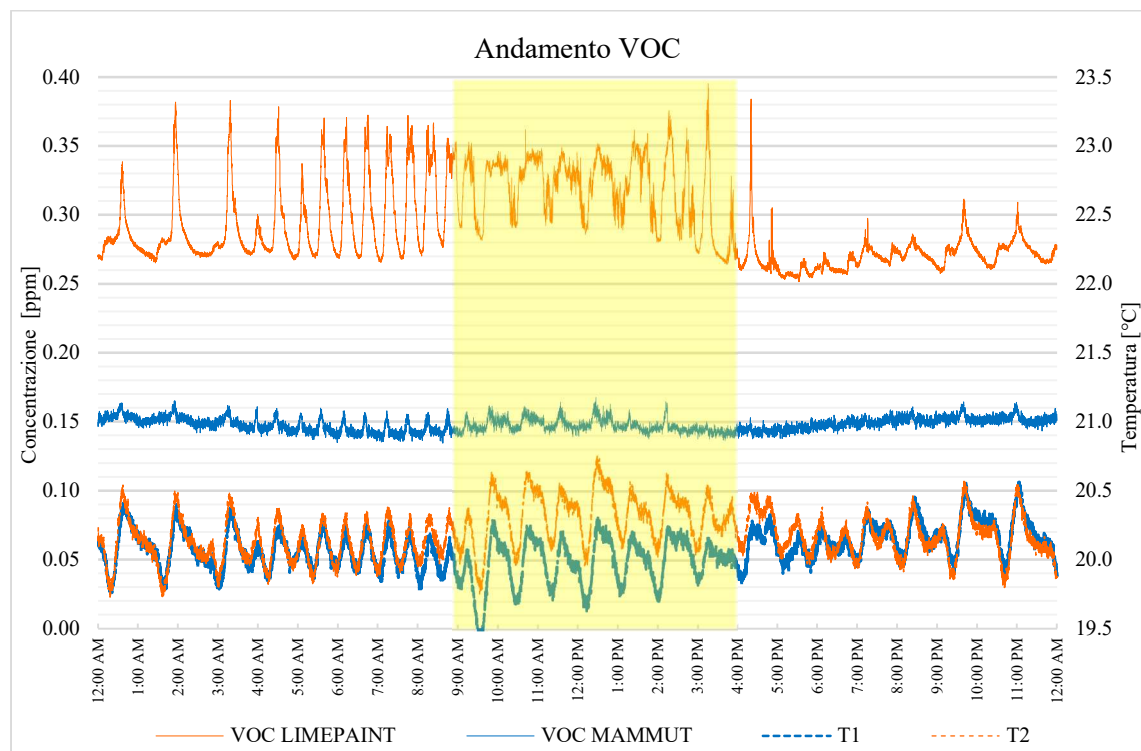


Grafico 19- Andamento concentrazioni VOC senza modifiche dei parametri microclimatici

Vengono riportati dei grafici di una giornata tipo della prima settimana di monitoraggio. Dai primi risultati, nelle due stanze si nota una differenza di concentrazione VOC, maggiore nel box 2 dove vi è la finitura Limepaint. Questo può essere dovuto dalla presenza nell'aria di composti volatili, per cui la finitura MAMMUT ha iniziato subito a ridurre le concentrazioni mediante

l'assorbimento. In particolare, i VOC registrati nel box2 hanno un valor medio doppio (circa 0,30 ppm) rispetto a quello del box1 (circa 0,15 ppm). L'andamento non è perfettamente costante ma oscillatorio con ampiezze più alte per la finitura commerciale. I picchi delle oscillazioni coincidono con i picchi della curva che rappresenta la temperatura. Quando la temperatura media è al di sotto dei 20°C, il sistema prevede l'accensione del termoconvettore posto nell'anticamera per arrivare alla temperatura fissata, mentre, se la temperatura media supera i 20°C, si ha lo spegnimento del termoconvettore per ristabilire la temperatura fissata. Si nota inoltre l'aumento della temperatura nella fascia più calda della giornata, dalle 9:00 alle 16:00 (evidenziato in giallo), durante la quale alla temperatura interna si aggiunge la radiazione solare esterna che colpisce e riscalda l'involucro della struttura. In questo arco temporale nel box2 si ha una riduzione piuttosto bassa delle ampiezze di oscillazione dei VOC che si riduce ancor più dopo le 16:00 quando il sensore della finitura LIMEPAINT descrive un andamento con frequenze e ampiezze del tutto diverse rispetto a quelle della prima parte della giornata; questo vuol dire che anche la finitura commerciale assorbe VOC ma non riduce l'inquinamento ai valori bassi che si registrano con la finitura MAMMUT. Quest'ultima pur all'aumentare della temperatura nelle ore più calde della giornata, non aumenta le oscillazioni anzi, esse vengono ridotte notevolmente. Di conseguenza si può parlare di un'inerzia del materiale innovativo rispetto alle variazioni di inquinamento indoor e di incremento di temperatura.

Dal grafico successivo (*grafico 20*) è possibile notare una differenza anche tra le temperature superficiali e tra le umidità relative dei box. Per quanto riguarda le temperature superficiali, esse, in entrambi i box, sono più basse (solo di qualche decimo) rispetto a quelle ambientali dal momento che le posizioni dei sensori all'interno di ciascun compartimento sono differenti: i sensori di temperatura ambientali dei box sono sospesi (a circa 2,5 m d'altezza da terra) e più in alto rispetto ai sensori superficiali posti sulle pareti (a 1,3 m da terra)

e, considerata l'assenza di una ventilazione che possa rendere omogenee le condizioni indoor, l'aria più calda si stratifica in alto. Inoltre, si può notare che le due finiture non registrano uguali temperature RTD, anzi, a differenza delle temperature ambientali, la finitura MAMMUT ha l'RTD1 superiore alla RTD2 della LIMEPAINT. In particolare, nelle ore più calde della giornata le due curve RTD si allontanano tra loro. Questo $\Delta RTD = 0,5 \text{ } ^\circ\text{C}$ è piuttosto esiguo, pertanto, è difficile poter parlare di inerzia termica della finitura MAMMUT. In ogni caso questo fenomeno di variazione può essere dovuto alla densità della finitura MAMMUT leggermente superiore a quella LIMEPAINT che dunque aumenta il potere massivo responsabile dell'accumulo di energia termica e di conseguenza dell'aumento della temperatura sul materiale anziché nell'ambiente del box1. Nelle ore più calde la superficie con la finitura tradizionale, al contrario, subisce un aumento di temperatura maggiore. Per quanto riguarda l'umidità relativa essa risulta maggiore nel box 1, dove c'è la finitura MAMMUT.

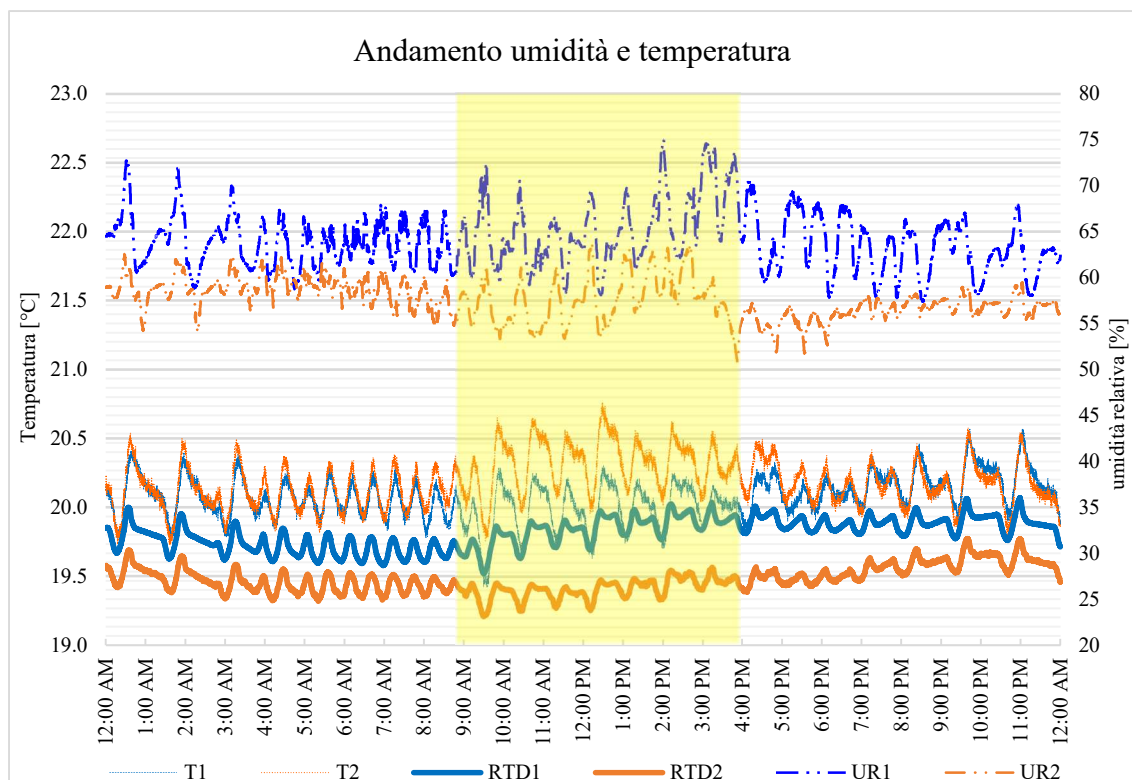


Grafico 20 - andamento umidità e temperatura senza modifiche dei parametri microclimatici

L'UR potrebbe essere più elevata sempre a causa della finitura che risulta ancora non completamente asciutta a inizio periodo di monitoraggio. Per questo viene acceso, nei giorni successivi, un deumidificatore per far scendere la percentuale. Con questa prova si dimostra il potere assorbente della finitura innovativa in condizioni ambientali in termini di inquinamento indoor e la sua inerzia termica nei confronti di moderate alterazioni della temperatura.

Inerzia interna con carico spot d'inquinante

Nel grafico che segue viene rappresentato l'andamento della concentrazione dei VOC e della temperatura in un arco temporale di mezza giornata. Con i valori "VOC MAMMUT", "T1", "RTD1" e "UR1" si fa riferimento ai parametri registrati per il box 1, dove è presente la finitura UNIVPM, mentre con i valori "VOC LIMEPAINT", "T2", "RTD2" e "UR2", si fa riferimento ai parametri registrati nel box 2, dove è presente la finitura LIMEPAINT della Diasen. La prova è stata realizzata con l'immissione di 10 μ L di MEK all'interno di ciascuno dei box con un carico spot mediante una siringa graduata.

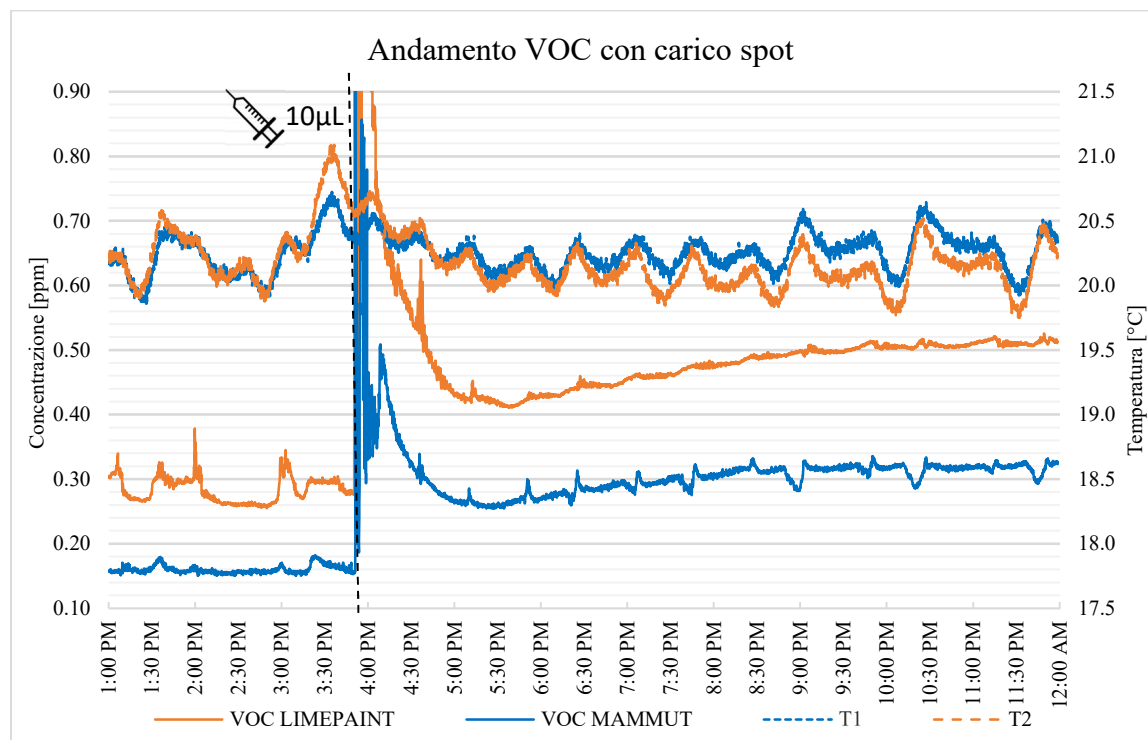


Grafico 21-Grafico andamento VOC con carico spot di 10 μ L di MEK

La temperatura è mantenuta costante a 20°C dall'accensione del termoconvettore posto nell'anticamera. Nella condizione di stazionarietà della concentrazione dei VOC nell'ambiente, 0,28 ppm per LIMEPAINT e 0,17 ppm per MAMMUT, alle ore 16:00 è stato effettuato un carico spot di 10 μ L di Metil Etil Chetone in entrambi i box e immediatamente si è registrato un picco in ambedue gli ambienti. L'attendibilità del valore massimo di picco viene trascurata in quanto nei due ambienti non è presente un sistema di ventilazione che possa uniformare la composizione dell'aria in tutto il volume. Per quanto riguarda la cinetica di assorbimento, il tratto discendente delle due finiture ha pressoché la stessa inclinazione. Dopo 1 ora dal carico, i valori di inquinante raggiungono il punto più basso (0,41ppm per la finitura LIMEPAINT e 0,27 ppm per la finitura MAMMUT), poi risalgono fino a stabilizzarsi ad un valore costante per entrambi i box, ma traslato rispetto al valore costante che si aveva prima dell'iniezione di MEK. In entrambi i box, il valore di VOC si stabilizza a circa 0,20 ppm più elevati rispetto al valore che si aveva prima dell'iniezione.

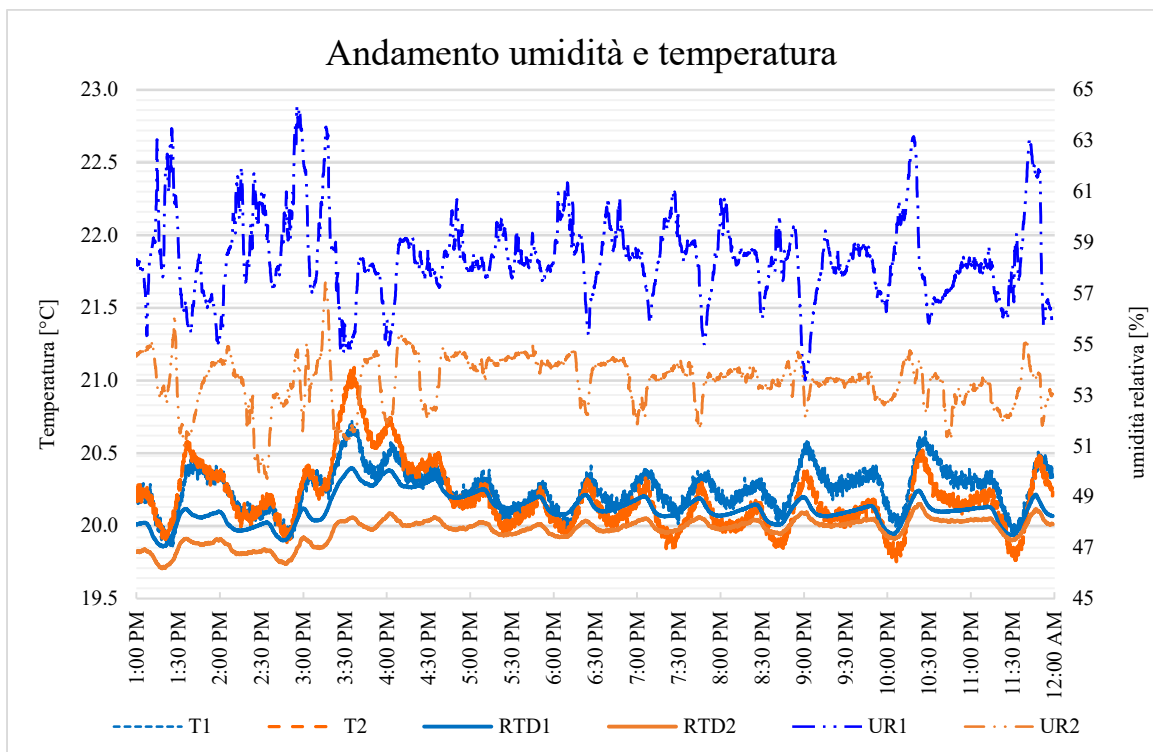


Grafico 17- Andamento di temperatura e UR con carico spot MEK

La temperatura ambientale invece coincide quasi sempre in entrambi i box. Si ha un allontanamento delle due curve solo nelle ore serali in cui la temperatura esterna scende. Questa diminuzione di temperatura influenza la temperatura nel box2, mentre quella del box1 rimane più alta a causa del rilascio di calore accumulato grazie all'inerzia termica della finitura innovativa. Per tutta la prova i parametri ambientali restano costanti: l'UR, leggermente più alta nel box 1, oscilla intorno al $55\pm 2\%$ mentre le temperature superficiali misurano sempre $20\pm 0.5^\circ\text{C}$ e le ambientali dei box $20\pm 1^\circ\text{C}$. Le temperature superficiali sono inferiori rispetto a quelle ambientali dei box. In particolare, la temperatura superficiale RTD2 rimane sempre al di sotto di quella della finitura innovativa MAMMUT. La temperatura ambientale dei box1, invece, subisce un incremento nel momento in cui la porta dell'anticamera viene aperta dall'operatore per l'iniezione del ME; poi decresce e torna a stabilizzarsi intorno a 20°C . Dopo la discesa si può notare come la curva della temperatura del box1 si stabilizzi al di sopra del box2: questo testimonia il potere di accumulo e rilascio termico dovuto all'inerzia della finitura MAMMUT.

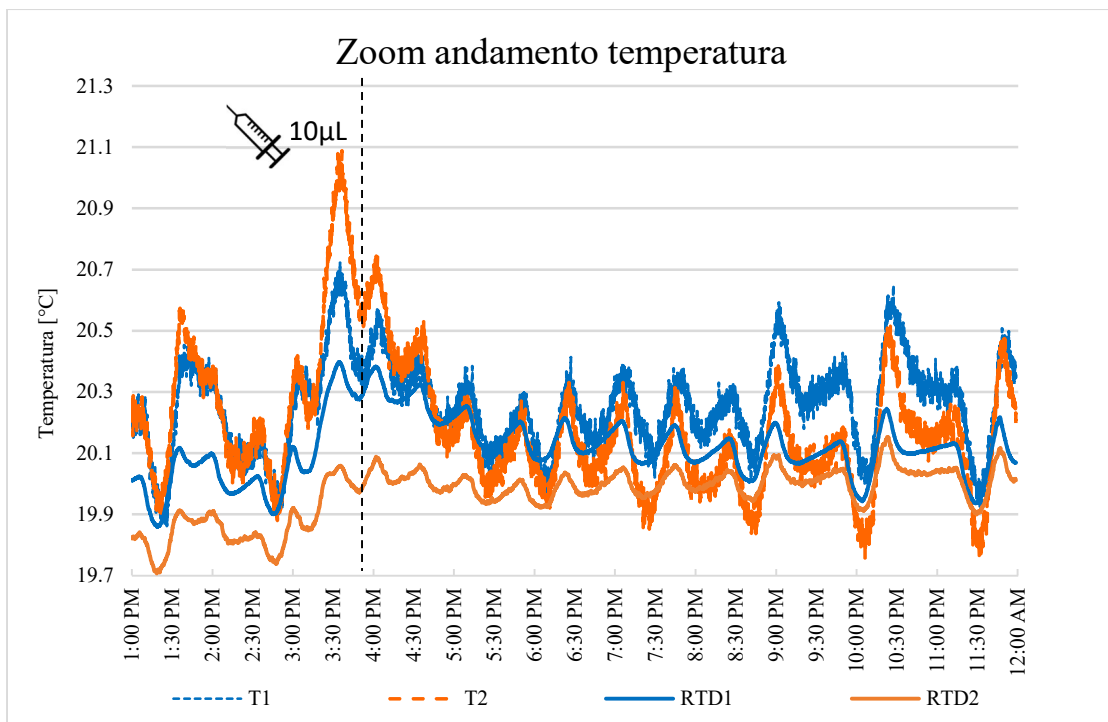


Grafico 2318- Zoom Andamento di temperatura con carico spot MEK

Inerzia interna con carico diffuso d'inquinante

Nel grafico che segue viene rappresentato l'andamento della concentrazione dei VOC e della temperatura in un arco temporale di mezza giornata. Con i valori "VOC MAMMUT", "T1" e "UR1" si fa riferimento ai parametri registrati per il box 1, dove è presente la finitura UNIVPM, mentre con i valori "VOC LIMEPAINT", "T2" e "UR2", si fa riferimento ai parametri registrati nel box 2, dove è presente la finitura LIMEPAINT della Diasen. La prova è stata realizzata con l'immissione di 10mL di MEK all'interno di ciascuno dei box con un carico statico diffuso posto all'interno di un bicchierino in vetro posizionato al centro del pavimento di ciascun box. La temperatura è mantenuta costante a 20°C dall'accensione del termoconvettore posto nell'anticamera.

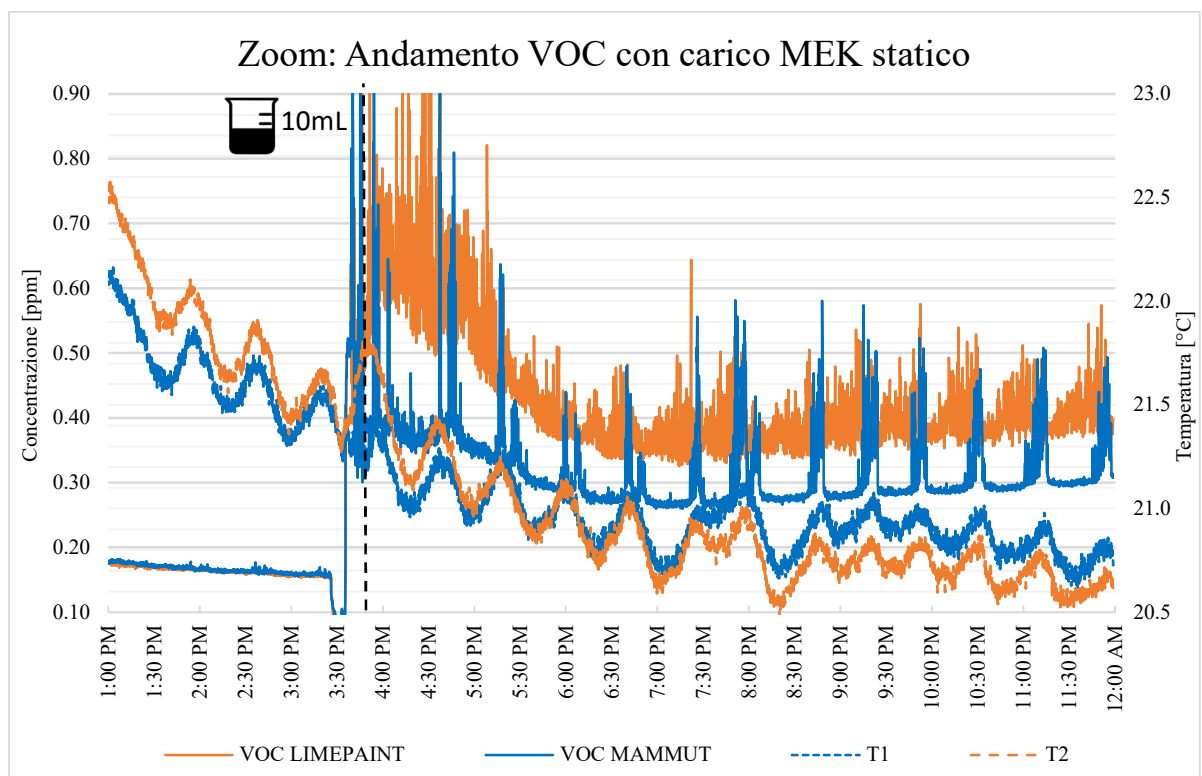


Grafico 19- Grafico andamento VOC con carico MEK statico diffuso

Dal grafico si osserva che prima del carico, i valori di VOC nei due box coincidono a circa 0,17 ppm. Nell'istante in cui il carico di 10mL di MEK viene inserito nei box, i sensori registrano un incremento di concentrazione non più segnato da un picco istantaneo e poi una ripida discesa come nelle prove con

carico spot. Nel box2 con il carico MEK, il sensore rileva un incremento di VOC fino a 0,80 ppm che molto lentamente, nel giro di circa 3 ore viene assorbito dalla finitura LIMEPAINT fino a stabilizzarsi attorno a un valore di circa 0,36ppm. Nel box1 i VOC non raggiungono valori elevati come il box2 appena dopo il carico; infatti salgono a 0,37 ppm e in 1 ora scendono e si stabilizzano a 0,30 ppm. Questo dimostra la proprietà di assorbimento passivo dei due materiali, più prestante nella finitura innovativa: essa impiega meno tempo ad abbattere il picco e a ristabilizzarsi ad un valore costante più basso. Altro aspetto da non sottovalutare è che a concentrazioni stazionarie maggiori (dopo la discesa) è presente uno shift dei grafici delle concentrazioni di VOC: a basse concentrazioni, prima del carico, le curve coincidono, a più alte concentrazioni invece, la finitura MAMMUT trattiene più inquinante di quanto non faccia la finitura LIMEPAINT.

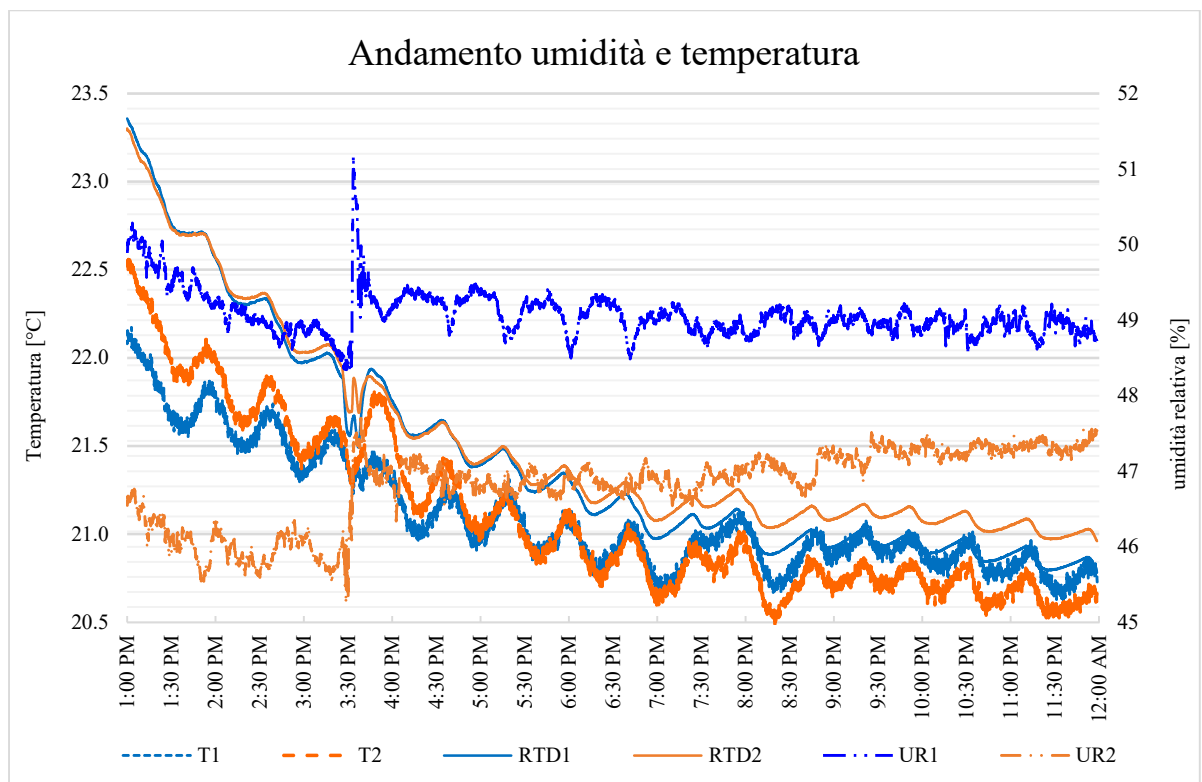


Grafico 25- Andamento di umidità e temperatura

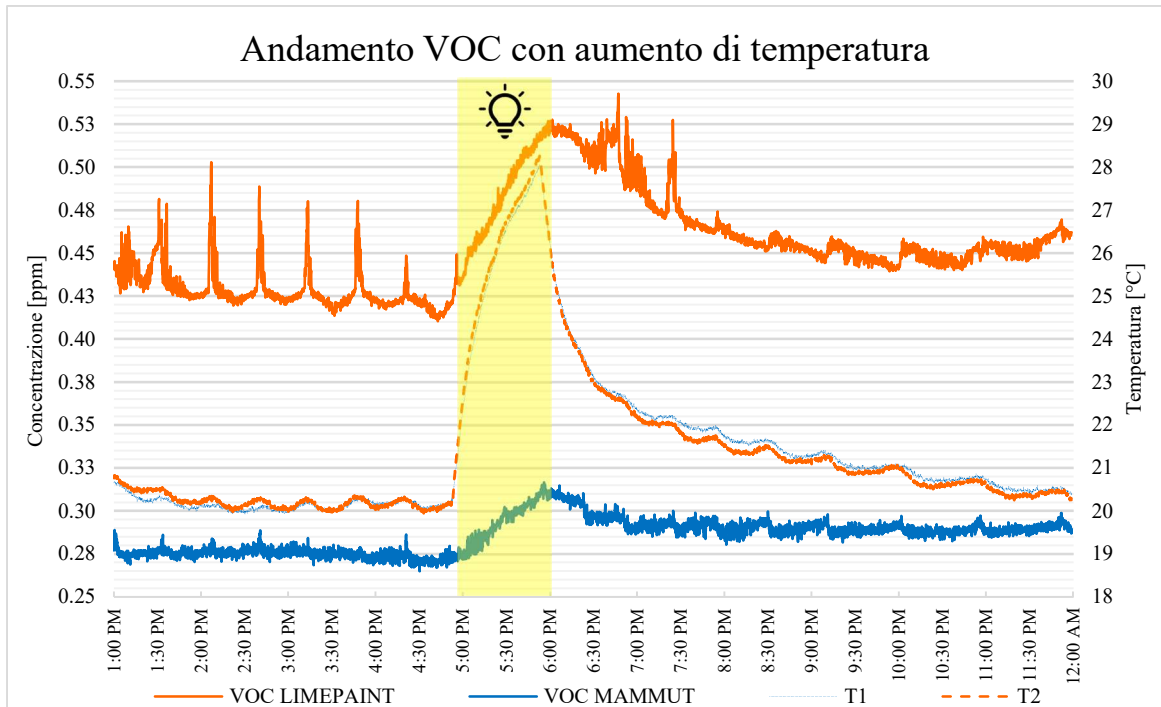
6.2. Inerzia interna con accensione delle lampade

Inerzia interna con accensione lampada UV 300W

Nel grafico che segue viene rappresentato l'andamento della concentrazione dei VOC e della temperatura prima durante e dopo l'accensione della lampada Ultra Vitalux 300 W che. Con i valori "VOC MAMMUT", "T1", "RTD1" e "UR1" si fa riferimento ai parametri registrati per il box 1, dove è presente la finitura UNIVPM, mentre con i valori "VOC LIMEPAINT", "T2", "RTD2" e "UR2", si fa riferimento ai parametri registrati nel box 2, dove è presente la finitura LIMEPAINT della Diasen. La prova è stata realizzata senza l'immissione del MEK all'interno dei box. Nel grafico che segue viene rappresentato l'andamento della concentrazione dei VOC e della temperatura dei box in un arco temporale di mezza giornata. La temperatura è mantenuta costante dal termoconvettore impostato a 20°C nell'anticamera. I sensori dei VOC presentano sempre un andamento oscillatorio con le creste coincidenti con i picchi di temperatura. L'andamento è molto più smorzato nel box della finitura MAMMUT. Infatti, se l'ampiezza massima di oscillazione del sensore LIMEPAINT è di circa 0,05ppm quella della finitura innovativa ha un'escursione minore di 0,01ppm. I valori medi dei VOC registrati dai sensori sono sempre superiori nel caso della LIMEPAINT rispetto a quelli della finitura MAMMUT: prima dell'accensione della lampada, la differenza tra i due sensori è generalmente stazionaria del valore di circa $\Delta\text{ppm} = 0,15$.

La lampada Ultra Vitalux 300 W (lampada UV 300W), accesa per circa un'ora (dalle 17:00 alle 18:00), provoca un innalzamento della temperatura simile in entrambi i box: ambedue passano da 20°C a 28°C.

Dal grafico si evince che l'aumento di temperatura dell'aria interna provoca emissione di VOC da parte dei materiali da costruzione nell'ambiente. In particolare, dopo un'ora di accensione la malta tradizionale LIMEPAINT emette VOC aumentandone la concentrazione del 23%, portandola quindi da un valore costante di 0,43 ppm a 0,53 ppm di picco ($\Delta\text{ppm} = 0,10$).



*Grafico 26- Andamento VOC con accensione lampada UV 300W.
Irradianza UV =3 W/m² , irradianza VIS =18 W/m²*

Con lo spegnimento della lampada, la velocità di adsorbimento dei VOC da parte della malta tradizionale è di 0,08ppm/h. La finitura LIMEPAINT nel box 2 impiega 3 ore per tornare a un regime stazionario della concentrazione di VOC i quali comunque, rispetto al valore costante di partenza (0,43 ppm), sono passati a una concentrazione costante più alta (0,45 ppm). Dopo un'ora di accensione la finitura MAMMUT emette VOC aumentandone la concentrazione del 14%, portandola da un valore costante di 0,27 ppm a 0,31 ppm di picco ($\Delta\text{ppm}=0,04$). Con lo spegnimento della lampada, la velocità di adsorbimento da parte della malta innovativa è di 0,04ppm/h. Sebbene la cinetica di assorbimento di MAMMUT abbia una pendenza più bassa rispetto a quella della finitura LIMEPAINT, nel box 1 la finitura impiega soltanto 1 ora per tornare a un regime stazionario della concentrazione di VOC i quali, rispetto al valore costante di partenza, sono a una concentrazione costante di poco più alta (0,29 ppm). Questi aspetti confermano il potere assorbente della finitura innovativa rispetto all'inquinamento indoor che è efficace anche ad incrementi più elevati di temperatura.

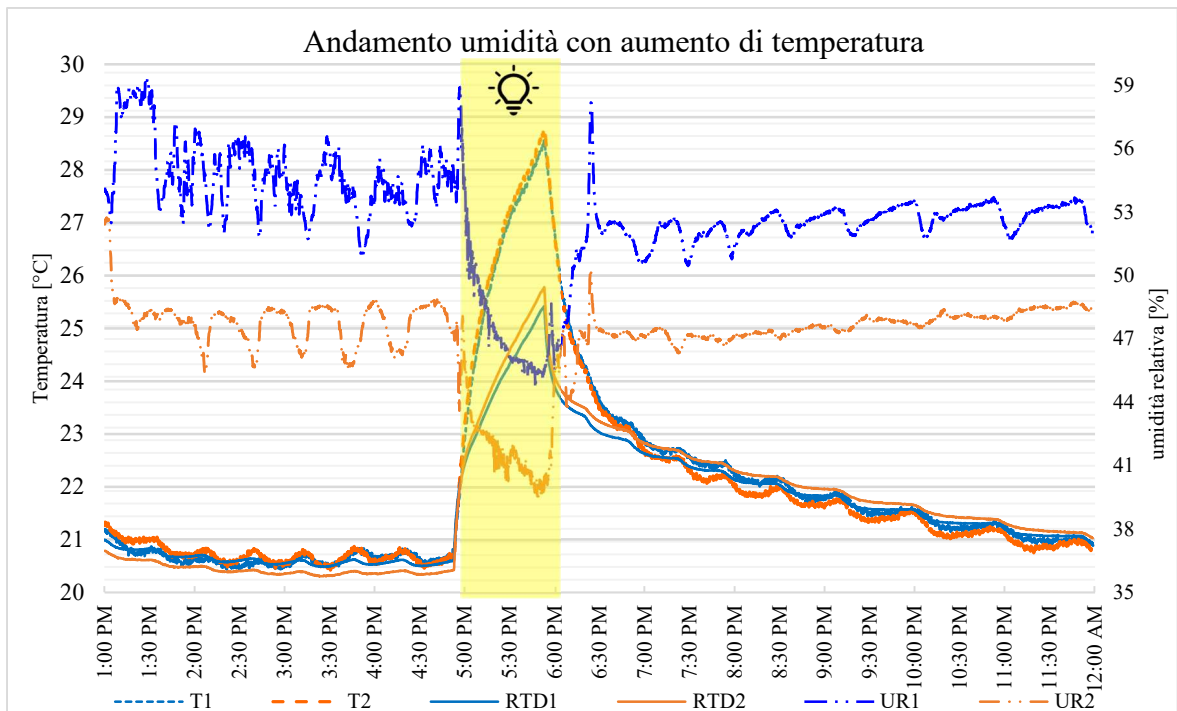


Grafico 27 -Andamento di temperatura e umidità relativa con accensione lampade UV 300W
Irradianza UV =3 W/m² , irradianza VIS =18 W/m²

Dal grafico che relaziona umidità relativa e temperatura, si nota che l'accensione delle lampade UV 300 W provoca un cambiamento di questi parametri microclimatici. Le temperature ambientali e superficiali, pur seguendo un andamento e un'oscillazione a stesse frequenze, presentano delle differenze. Le temperature ambientali T1 e T2 dei box sono più alte prima dell'accensione della lampada; in particolare la curva della temperatura del box2 si trova quasi in sovrapposizione con la curva della temperatura del box1. Durante l'accensione della lampada, le due curve salgono con la stessa pendenza ad un valore di picco di 28°C. Con lo spegnimento della lampada le temperature discendono ma la curva MAMMUT è traslata di 0,5°C più in alto. Questo seppur basso aumento della temperatura, conferma il rilascio più lento del calore accumulato per inerzia termica della finitura MAMMUT. Le temperature superficiali invece sono più basse di quelle ambientali prima dell'accensione ma diventano più alte dopo lo spegnimento a causa della posizione dei PT100 che sono in asse con la direzione del fascio di luce delle lampade UV 300 W, l'incremento è più elevato per le temperature superficiali

che per quelle ambientali dei due box. Inoltre, prima dell'effetto della lampada, era la RTD1 ad avere valori superiori a RTD2, dopo l'accensione si ha uno scambio: la finitura MAMMUT incamera più energia termica rispetto a quella LIMEPAINT.

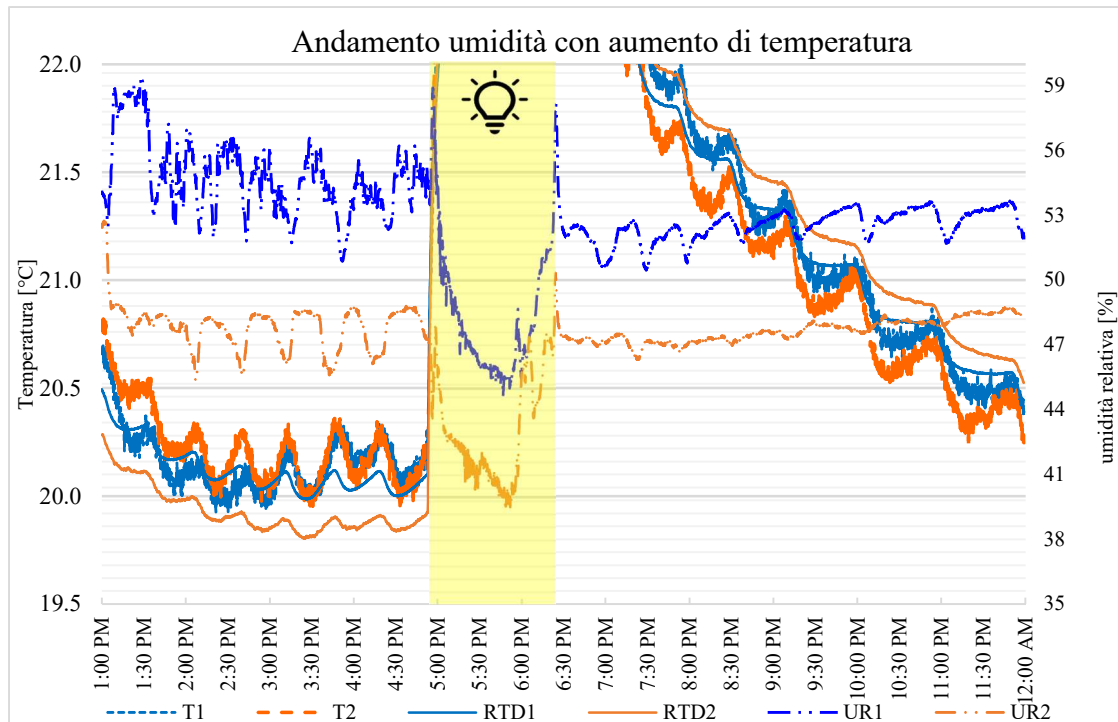


Grafico 28 - Zoom andamento temperature e umidità con accensione lampada UV 300W
Irradianza UV = 3 W/m^2 , irradianza VIS = 18 W/m^2

L'umidità relativa subisce un crollo durante la fase di riscaldamento ad opera della lampada, scende del 10% per ciascuno dei box. Per il resto della prova ha un andamento oscillante in entrambi i box ma presenta una differenza di circa 5 punti percentuali per le due finiture a causa dei motivi trattati in precedenza.

6.3. Capacità di ridurre umidità

Inerzia interna con aumento di umidità

Nel grafico che segue viene rappresentato l'andamento della concentrazione dei VOC e della temperatura in un arco temporale di mezza giornata. Con i valori "VOC MAMMUT", "T1", "RTD1" e "UR1" si fa riferimento ai parametri registrati per il box 1, dove è presente la finitura UNIVPM, mentre con i valori "VOC LIMEPAINT", "T2", "RTD2" e "UR2", si fa riferimento ai parametri registrati nel box 2, dove è presente la finitura LIMEPAINT della Diasen. La prova è stata svolta senza immissione di inquinante all'interno dei box, ma è stata caratterizzata da un aumento di umidità per testare la proprietà di moisture buffering dei materiali. All'interno di ciascuno dei box sono stati inseriti degli umidificatori della Medisana che hanno lo scopo di regolare il tasso di umidità degli ambienti chiusi tramite delle emissioni di vapore. Essi sono stati regolati alle ore 16:00 con un'umidità di set point pari all' 80%. La temperatura è mantenuta costante a 20°C dall'accensione del termoconvettore posto nell'anticamera.

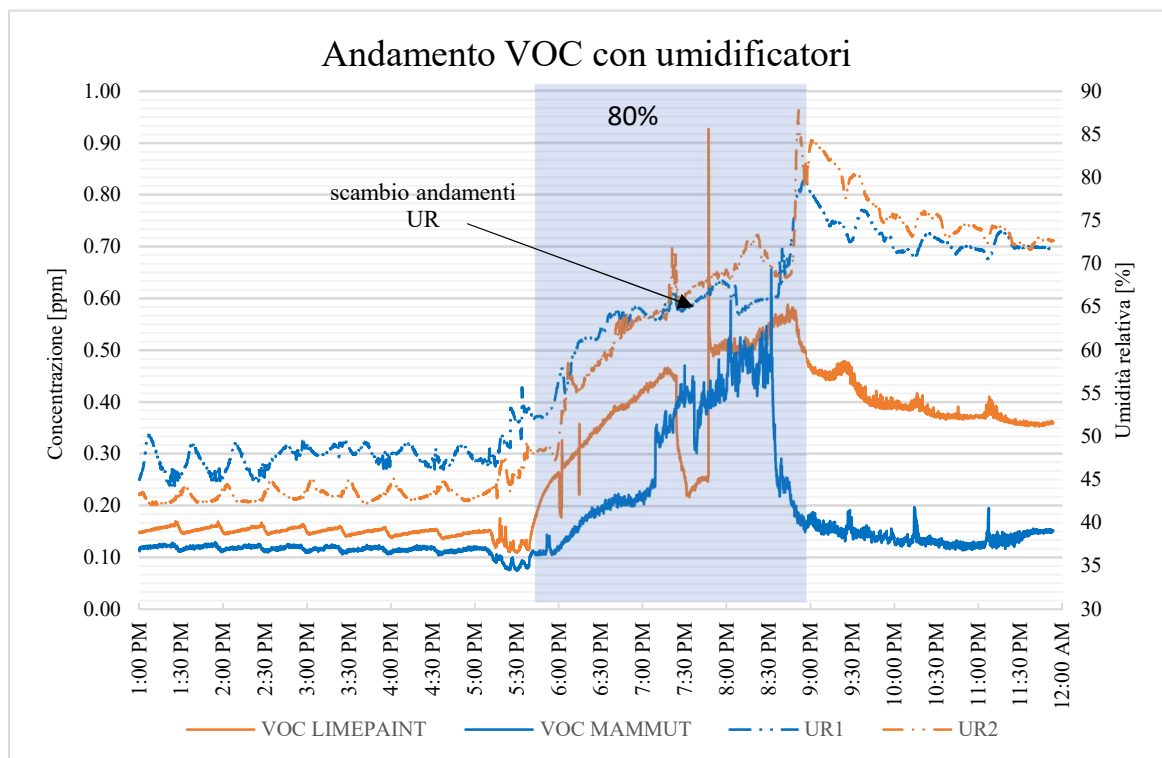


Grafico 29 - Andamento VOC con umidificazione a 80%

I due box hanno impiegato circa 3 ore per il raggiungimento dell'UR all'80%. Prima della fase di umidificazione, l'umidità della finitura innovativa, come nelle prove precedenti assume valori costanti ma superiori di quelli della finitura commerciale di circa 5 punti percentuali. Durante la fase di umidificazione, le curve dell'UR dei due box salgono con una rapidità non perfettamente coincidente. Un fenomeno importante che si può notare nel grafico si manifesta a metà durata dell'umidificazione, quando l'UR rilevata è di circa il 65%: l'umidità relativa del box2 aumenta più velocemente di quella del box1. Questo aspetto può essere dovuto alla proprietà di moisture buffering della superficie MAMMUT. Inoltre, durante la fase di umificazione, c'è stata emissione di VOC nell'ambiente probabilmente dovuta alla polarità delle molecole d'acqua che hanno attratto i composti organici volatili nell'aria. Sia nel box1 che nel box2 la concentrazione dei VOC ha raggiunto valori di 0,45 ppm rispetto a 0,12 e 0,15 ppm di partenza rispettivamente. Al termine dell'umidificazione inizia l'assorbimento VOC da parte delle finiture.

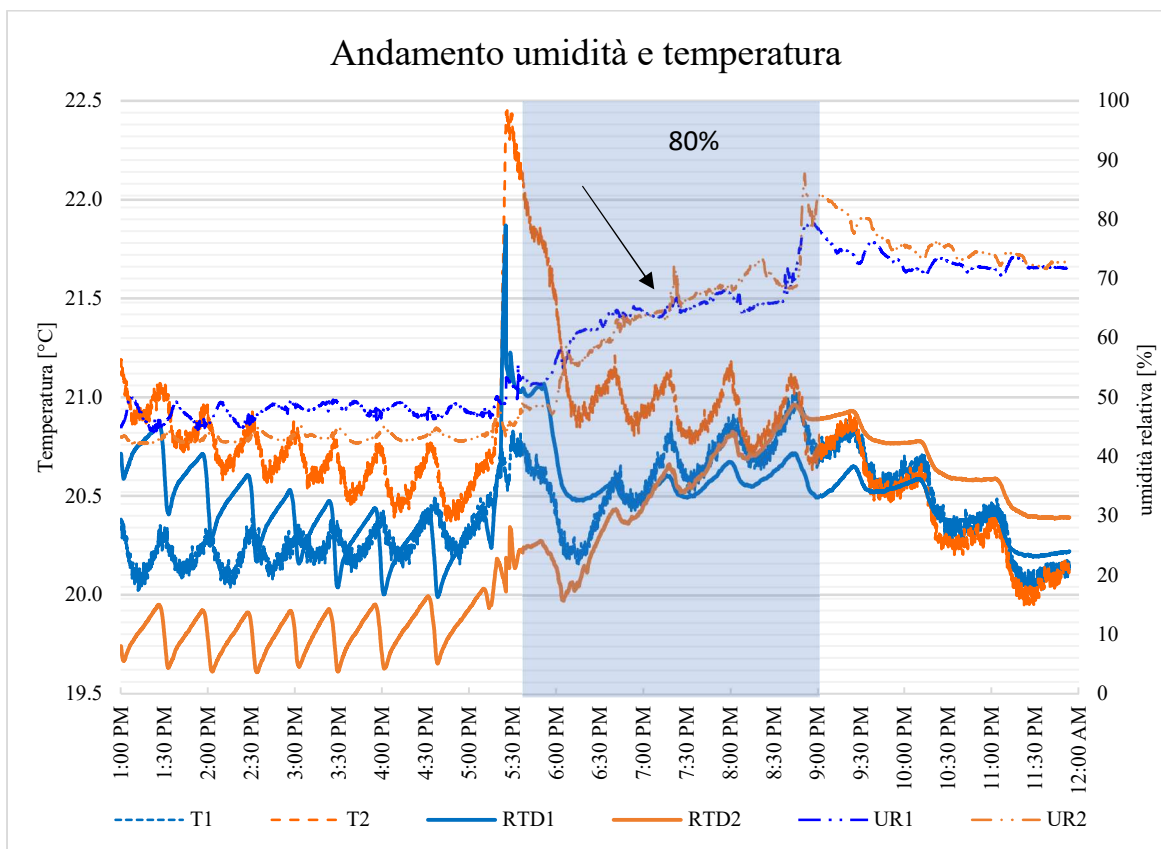


Grafico 30 - Andamento di temperatura e umidità con umidificazione 80%

La cinetica di assorbimento è più rapida nel box1: la finitura UNIVPM da un picco di 0,55 ppm (alle 20:30 circa) scende in 30 minuti a un valore di 0,15 ppm che poi resta costante. Nel box2 la finitura LIMEPAINT passa in 1 ora circa dal picco di 0,55 ppm (alle 20:45 circa) a 0,36 ppm costante. Le temperature sono influenzate dal funzionamento del termoconvettore. Inoltre, prima della fase di umidificazione, rilevano tutte temperature comprese tra 19,5 °C e 21 °C. Nel box2 la temperatura superficiale della finitura LIMEPAINT è più bassa rispetto a quella dell'ambiente del rispettivo box di quasi 1,5°C mentre nel box1 le due temperature assumono quasi lo stesso valore compreso. In particolare, dal grafico si nota che le temperature che caratterizzano il box della finitura MAMMUT sono comprese nella fascia descritta dalle due curve di temperature del box2: questo aspetto conferma una piccola azione di inerzia termica della malta innovativa che tende a non far manifestare escursioni termiche troppo elevate rispetto alla temperatura media desiderata.

6.4. Effetti combinati

Inerzia interna con carico spot d'inquinante e accensione lampada UV 300W

Nel grafico che segue viene rappresentato l'andamento della concentrazione dei VOC e della temperatura in un arco temporale di 6 ore (dalle 8:00 alle 16:00). Con i valori "VOC MAMMUT", "T1", "RTD1" e "UR1" si fa riferimento ai parametri registrati per il box 1, dove è presente la finitura UNIVPM, mentre con i valori "VOC LIMEPAINT", "T2", "RTD2" e "UR2", si fa riferimento ai parametri registrati nel box 2, dove è presente la finitura LIMEPAINT della Diasen. La prova è stata realizzata con l'immissione di 10 μ L di MEK all'interno di ciascuno dei box con un carico spot mediante una siringa graduata. La temperatura è mantenuta costante a 20°C dall'accensione del termoconvettore posto nell'anticamera. Dopo 30 min viene accesa la lampada Ultra Vitalux 300 W (lampada UV 300W) che ha il compito di simulare lo spettro solare. In questo modo entrambi i box è aumentata la temperatura fino a 28°C.

Nella condizione di stazionarietà della concentrazione dei VOC nell'ambiente, 0,35 ppm per LIMEPAINT e 0,22 ppm per MAMMUT, alle ore 9:30 è stato effettuato un carico spot di 10 μ L di Metil Etil Chetone in entrambi i box e immediatamente si è registrato un picco in ambedue gli ambienti. L'attendibilità del valore massimo di picco viene trascurata in quanto nei due ambienti non è presente un sistema di ventilazione che possa uniformare la composizione dell'aria in tutto il volume. Per quanto riguarda la cinetica di assorbimento, il tratto discendente delle due finiture ha pressoché la stessa inclinazione. Dopo 30 min dal carico viene accesa la lampada UV 300 W, posta a 1,2 m di distanza dalla superficie delle malte, che comporta il repentino aumento della temperatura. L'irradianza misurata è:

Box 1

UV --> max. 3,1 W/m² and close to the Tprobe 2,5 W/m²

VIS --> max. 18,5 W/m² and close to the Tprobe 16,3 W/m²

Box 2

UV --> max. 2,8 W/m² and close to the Tprobe 1,7 W/m²

VIS --> max. 18,1 W/m² and close to the Tprobe 13,1 W/m²

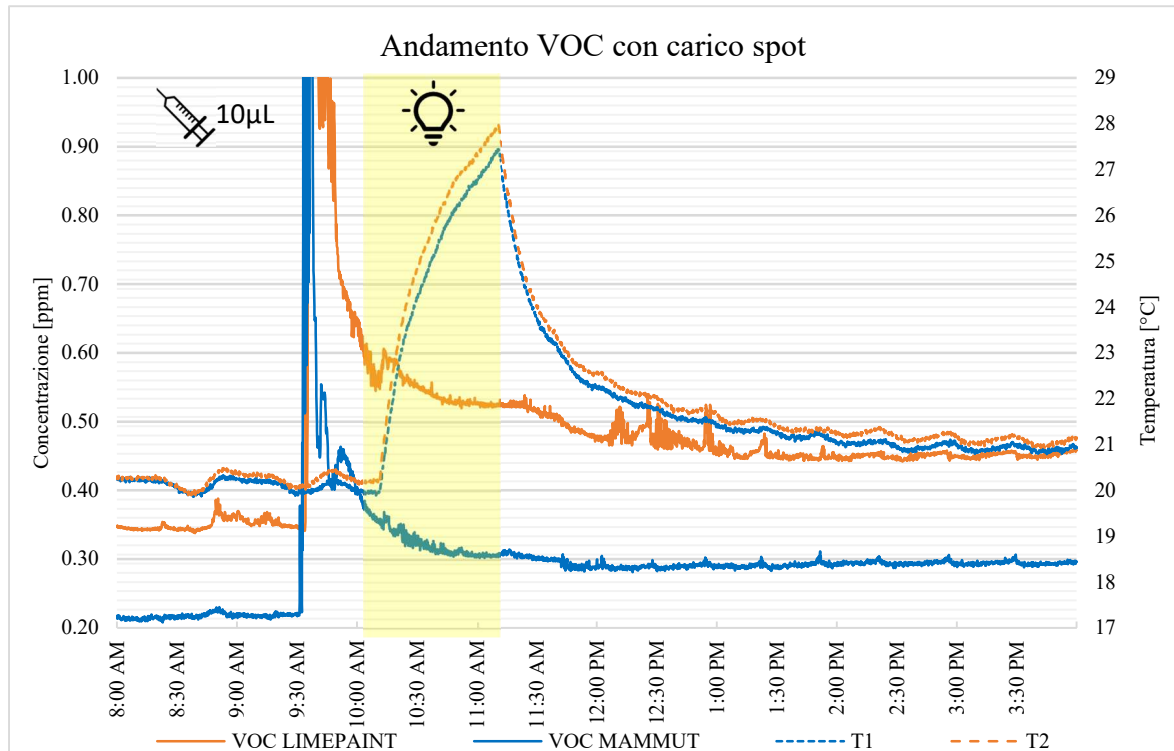


Grafico 31 20- Andamento VOC con carico spot MEK e accensione lampade UV 300W
Irradianza UV = 3 W/m², irradianza VIS = 18 W/m²

Da un'attenta osservazione, nei primi 5 minuti di accensione della lampada, si nota un piccolo rilascio di VOC ad opera della finitura LIMEPAINT che nei minuti successivi riprende il suo processo di assorbimento seppur con una inclinazione meno ripida. La finitura MAMMUT invece, in termini di assorbimento di inquinante, non risente della radiazione solare simulata; pertanto, continua con il suo andamento decrescente. Sempre considerando la cinetica di assorbimento, si nota che la finitura LIMEPAINT, dopo il carico MEK impiega 3,5 ore per raggiungere un valore costante di concentrazione che si stabilizza a 0,45 ppm, valore di un decimo superiore a quello che si aveva prima dell'iniezione. La finitura MAMMUT impiega 1,5 h per raggiungere il valore costante di 0,3ppm.

Dal grafico che relaziona umidità relativa e temperatura, si nota che l'accensione delle lampade UV 300W provoca un aumento di temperatura che è uguale per i due box: le curve, infatti, sono quasi del tutto sovrapposte. In particolare, l'incremento è più elevato per le temperature superficiali che per quelle ambientali dei due box. Questo fatto è principalmente dovuto alla posizione dei sensori PT100 di temperatura superficiali che sono inclusi nella zona irradiata direttamente dalle lampade. L'umidità relativa, diversa di circa 5 punti percentuali per i due box a causa dei motivi trattati in precedenza, durante la fase di accensione delle lampade, scende del 10% per ciascuno dei box.

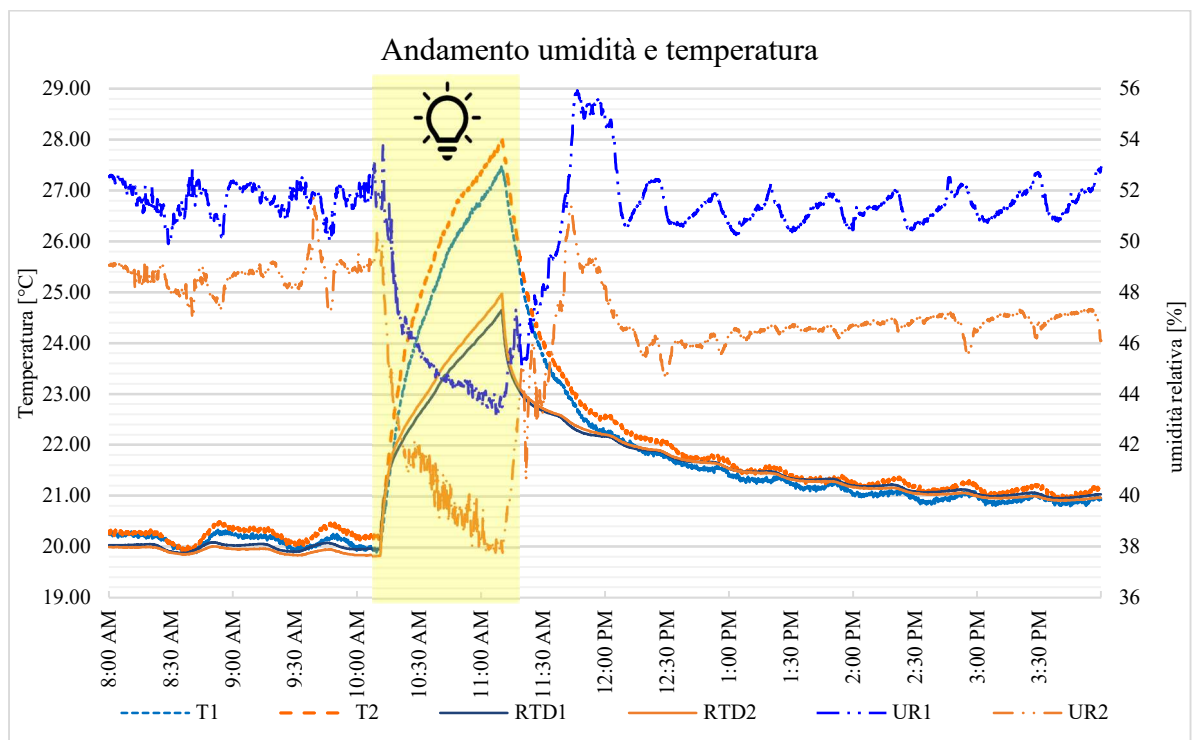


Grafico 32 - Andamento temperatura e umidità relativa con accensione lampade UV 300W
Irradianza UV = 3 W/m^2 , irradianza VIS = 18 W/m^2

Prima dell'accensione della lampada i parametri ambientali hanno oscillazioni con ampiezze moderate che li fanno variare attorno a valori costanti: l'UR, leggermente più alta nel box 1, oscilla intorno al $55 \pm 2\%$ mentre le temperature superficiali misurano sempre $20 \pm 0.5^\circ\text{C}$ e le ambientali dei box $20 \pm 1^\circ\text{C}$. La differenza tra le umidità relative dei box aumenta di fino a 5 punti

percentuali dopo l'azione della lampada. I valori si distaccano, MAMMUT più umido e LIMEPAINT meno umido, in correlazione con il cambiamento delle temperature che viene spiegato di seguito. Durante tutta la prova le temperature superficiali delle finiture sono leggermente inferiori rispetto a quelle ambientali dei box. In particolare, la temperatura superficiale RTD2 rimane sempre al di sotto di quella della finitura MAMMUT. Mentre la temperatura ambientale del box2 è più alta rispetto al box1. Durante l'accensione della lampada, le curve di temperatura salgono con la stessa ripidità. In particolare, le temperature del box 2 si mantengono più alte del box1 di 0,5°C. In entrambi i box le superfici si scaldano meno dell'ambiente, infatti, restano a circa 3°C più in basso. Dopo lo spegnimento, lungo la discesa della temperatura, la curva della temperatura della finitura MAMMUT si posiziona al di sotto di tutte le altre. Questo testimonia ancora una volta l'inerzia del materiale allo stress termico dell'ambiente indoor.

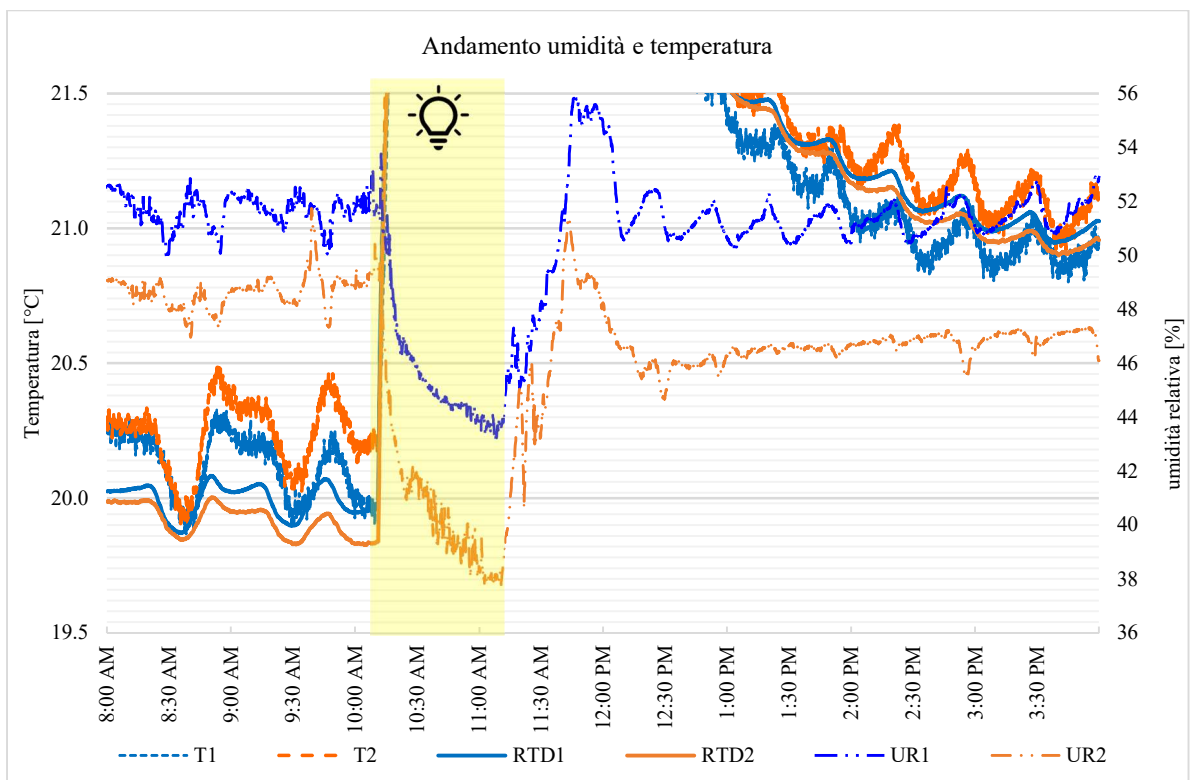


Grafico 33 - Zoom del grafico dell'andamento delle temperature con l'accensione delle lampade UV
 300W Irradianza UV = 3 W/m^2 , irradianza VIS = 18 W/m^2

Inerzia interna con carico spot d'inquinante e accensione lampada UV 100W

Per la prova su scala pilota dell'effetto fotocatalitico con le lampade UV 100W sono state effettuate due prove, ciascuna caratterizzata da repliche che confermassero il risultato ottenuto. Ciascuna prova è stata caratterizzata dalle stesse condizioni ambientali ma da una diversa distanza tra superficie della finitura e superficie della lampada.



Figura 61 - Installazione lampada UV 100W nei box

- ***Fotocatalisi a distanza 50 cm (43 cm)***

Nel grafico che segue viene rappresentato l'andamento della concentrazione dei VOC e durante la prova di fotocatalisi durata circa 3,5 ore. L'asta della lampada è distante 50 cm dal muro mentre la distanza tra superficie di finitura del muro e superficie emittente della lampada UV 100W è pari a 43 cm. Con i

valori "VOC MAMMUT", "T1" e "UR1" si fa riferimento ai parametri registrati per il box 1, dove è presente la finitura UNIVPM, mentre con i valori "VOC LIMEPAINT", "T2" e "UR2", si fa riferimento ai parametri registrati nel box 2, dove è presente la finitura LIMEPAINT della Diasen. Prima di procedere al carico di inquinante, mediante il fotoradiometro si è registrata la radianza della lampada nel range dell'UVA e del visibile.

Box 1

UV --> max. 8,4 W/m² and close to the Tprobe W/m²

VIS --> max. 30,0 W/m² and close to the Tprobe W/m²

Box 2

UV --> max. 8,1 W/m² and close to the Tprobe W/m²

VIS --> max. 28,6 W/m² and close to the Tprobe W/m²

La prova è stata realizzata con un carico spot di 100µL di inquinante MEK all'interno di ciascuno dei box mediante una siringa graduata. L'iniezione è stata seguita dall'accensione delle lampade UV 100W che ha emissioni sia nel range del visibile sia di quello UVA e UVB. Questa lampada ha il compito di attivare l'effetto fotocatalitico del fotocatalizzatore TiO₂ presente nella finitura del box1.

Il carico spot di 100µL di MEK ha provocato un picco in entrambi i box: si ha un picco molto elevato per LIMEPAINT ovvero 13,40ppm mentre per MAMMUT 4,98ppm. Il picco è stato seguito da un assorbimento simile da parte di entrambe le finiture. Nel primo tratto decrescente senza lampada (dalle 15:10 alle 15:30) le due finiture hanno una cinetica di assorbimento simile: LIMEPAINT Δ1,50ppm in 20 min, MAMMUT Δ1,50ppm in 20 min.

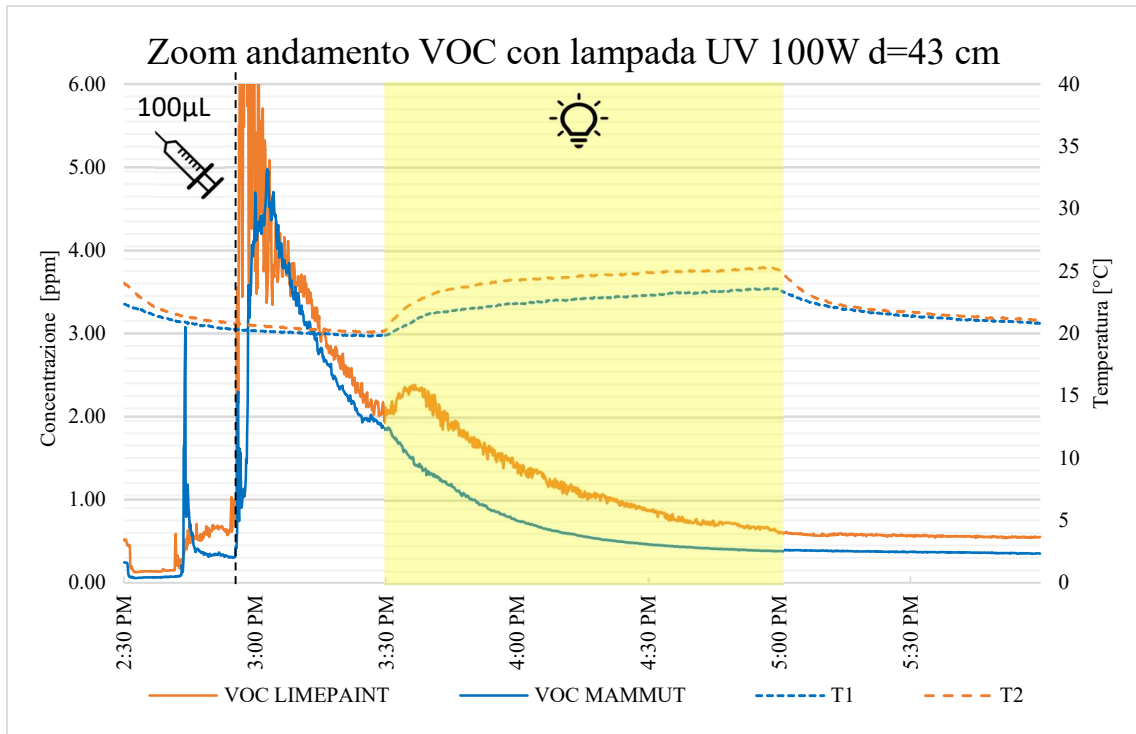


Grafico 21 - Andamento concentrazione VOC con accensione lampada UV 100W a d=43cm
Irradianza UV = 8 W/m², irradianza VIS = 29 W/m²

Dopo mezz'ora dal carico spot si è accesa la lampada UV 100W per 1 ora e 30 minuti che ha provocato un aumento di temperatura: nel box1 fino a 23°C nel box2 fino a 25°C. Durante l'accensione la concentrazione di VOC ha assunto andamenti divergenti: nel box2 i materiali hanno emesso VOC +0,36ppm per circa 10 minuti mentre nel box1 la finitura MAMMUT ha proseguito con l'assorbimento degli inquinanti. Trascorsi i 10 minuti dall'accensione della lampada, anche il box2 ha assunto il secondo tratto decrescente. Durante l'accensione della lampada (precisamente dalle 15:40 alle 16:00) la cinetica di assorbimento ha visto una diminuzione della concentrazione aerodispersa rilevata dai sensori pari a: LIMEPAINT - Δ 0,56ppm in 20 min e MAMMUT - Δ 0,73ppm in 20 min.

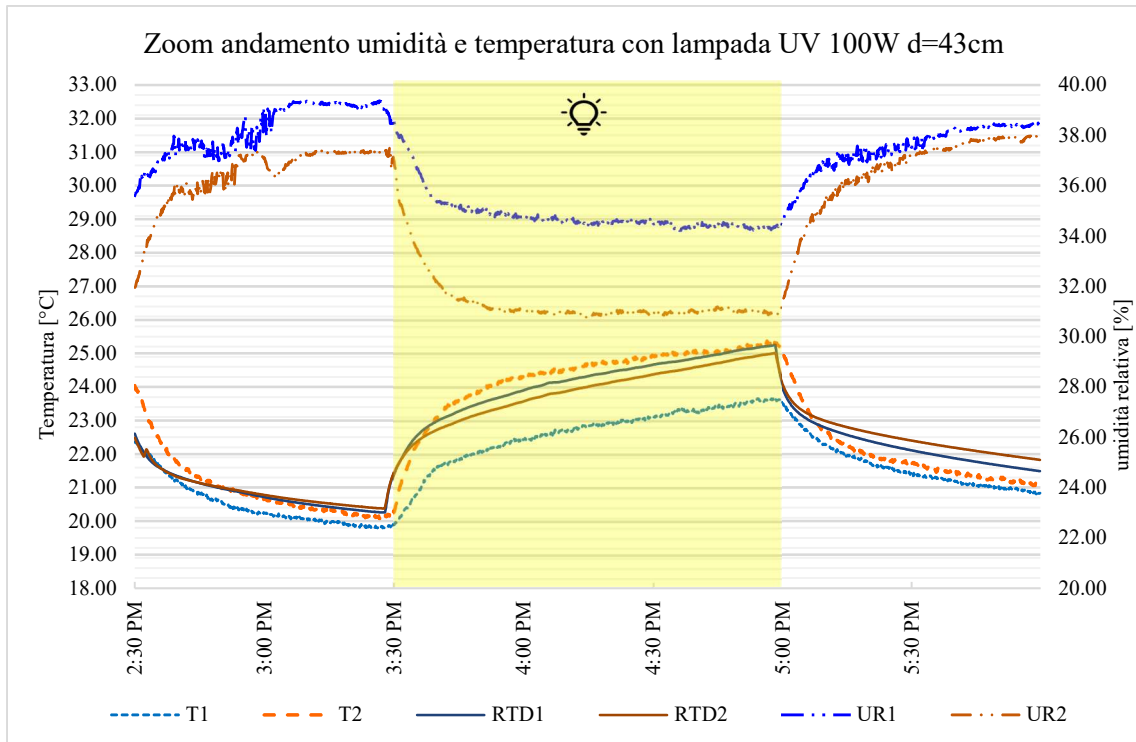


Grafico 35 - Andamento temperatura e umidità con lampada UV 100W d=43cm
Irradianza UV = 8 W/m^2 , irradianza VIS = 29 W/m^2

Con l'accensione delle lampade si ha un aumento di temperatura superficiale e ambientale in entrambi i box. Durante l'accensione della lampada UV 100W durata 1 ora e 30 min (dalle 15:30 alle 17:00) le temperature salgono aumentano di circa 5°C massimo. E' importante notare che nel box1 la T1 non aumenta tanto quanto la T2 nel box2. Le UR subiscono delle variazioni di circa il 2,5% durante la fase di accensione delle lampade. Anche in questo caso la variazione di UR è più elevata nel box2 rispetto al box1.

Si deduce che i parametri microclimatici di temperatura e umidità relativa sono più sensibili e oscillanti nel box2 rispetto al box1 probabilmente perché la finitura MAMMUT, grazie alle sue proprietà assorbenti (moisture buffer) riesce a mitigare l'ambiente indoor rendendolo non troppo caldo e asciutto quando la temperatura ambientale aumenta e non troppo freddo umido quando la temperatura scende.

- **Fotocatalisi a distanza 37 cm (29 cm)**

Nel grafico che segue viene rappresentato l'andamento della concentrazione dei VOC e durante la prova di fotocatalisi durata circa 3,5 ore. L'asta della lampada è distante 37 cm dal muro mentre la distanza tra superficie di finitura del muro e superficie emittente della lampada UV 100W è pari a 29 cm. Con i valori "VOC MAMMUT", "T1" e "UR1" si fa riferimento ai parametri registrati per il box 1, dove è presente la finitura UNIVPM, mentre con i valori "VOC LIMEPAINT", "T2" e "UR2", si fa riferimento ai parametri registrati nel box 2, dove è presente la finitura LIMEPAINT della Diasen. Prima di procedere al carico di inquinante, mediante il fotoradiometro si è registrata la radianza della lampada nel range dell'UVA e del visibile.

Box 1

UV --> max. 24 W/m² and close to the Tprobe W/m²

VIS --> max. 86 W/m² and close to the Tprobe W/m²

Box 2

UV --> max. 24 W/m² and close to the Tprobe W/m²

VIS --> max. 102 W/m² and close to the Tprobe W/m²

La prova è stata realizzata con un carico spot di 100µL di inquinante MEK all'interno di ciascuno dei box mediante una siringa graduata. L'iniezione è stata seguita dall'accensione delle lampade UV 100W che ha emissioni sia nel range del visibile sia di quello UVA e UVB. Questa lampada ha il compito di attivare l'effetto fotocatalitico del fotocatalizzatore TiO₂ presente nella finitura del box1.

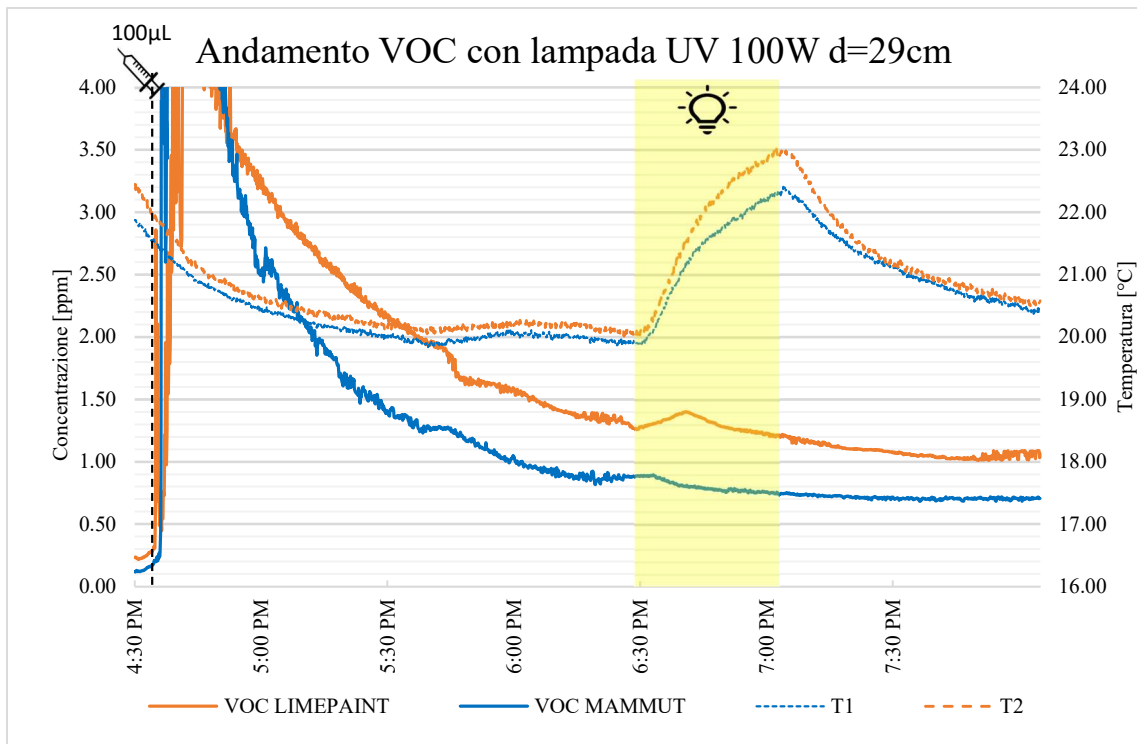


Grafico 36 - Andamento VOC con accensione lampada UV 100W d=29cm
 radianza UV = 24 W/m², irradianza VIS = 90 W/m²

Il carico spot di 100 μ L di MEK ha provocato un picco in entrambi i box che è stato seguito da un assorbimento da parte di entrambe le finiture. In particolare, durante la prima ora di assorbimento, la cinetica ha una velocità differente: in 1 ora nel box1 si raggiunge la concentrazione di 1,50 ppm mentre nel box2 dopo lo stesso tempo, si registrano ancora 2,1 ppm di inquinante. Nel box con la finitura LIMEPAINT l'inquinante diminuisce di $\Delta=8,42-2,2=6,22$ ppm in 1h mentre nel box con la finitura MAMMUT l'inquinante diminuisce di $\Delta=11,50-1,50=10,00$ ppm. Anche se questi gradienti non sono molto affidabili poiché il valore di picco non può essere considerato dal momento che l'assenza di ventilazione non rende omogenea la distribuzione dell'inquinante iniettato nei box, si conferma che la cinetica di assorbimento è più rapida nel box MAMMUT sia per la maggior pendenza della curva nel grafico sia per il raggiungimento di valori più bassi di concentrazione rispetto al box con la finitura LIMEPAINT. Scorsa la prima ora di assorbimento, dalle 17:30 in poi si ha un secondo tratto di decadimento

VOC che ha una pendenza meno inclinata per la finitura MAMMUT e più simile a quella della finitura LIMEPAINT: le finiture adesso assorbono con la stessa velocità, ma si trovano a concentrazioni di VOC traslate di 0,5ppm costanti. Le temperature sono mantenute sopra i 20°C (circa 21±1°C per entrambi i box) mediante il termoconvettore. Dopo 2 ore dal carico quando i valori di VOC si sono stabilizzati, 0,9 ppm nel box1 e 1,4 ppm nel box1, si accendono le lampade UV 100W per una durata di 30 minuti. Durante l'accensione la concentrazione di VOC ha assunto andamenti divergenti: nel box2 i materiali hanno emesso VOC +0,10 ppm per circa 10 minuti mentre nel box1 la finitura MAMMUT ha proseguito con l'assorbimento degli inquinanti. Trascorsi i 10 minuti dall'accensione della lampada, anche il box2 ha assunto il secondo tratto decrescente. Rispetto alla prova con la lampada Reptech UV 100W precedente a distanza 43 cm, il tratto emissivo/assorbente delle due finiture nei primi minuti di accensione ha pendenze meno ripide: la lampada più vicina (in questa prova) ha un fascio di luce che colpisce un'area di finitura più piccola rispetto a quella irradiata dalla lampada posta più lontana come la prova precedente. Con l'accensione della lampada, inoltre, si ha un aumento della temperatura nei box: fino a 23°C nel box2 e fino a 22°C del box1. Prima dell'azione della lampada, tutte le temperature assumono un valore compreso tra 20±0,5°C. Con l'accensione delle lampade si ha un aumento di temperatura superficiale e ambientale in entrambi i box. Durante l'accensione della lampada UV 100W durata 30 min (dalle 18:30 alle 19:00) le temperature salgono con variazioni differenti. E' importante notare che nel box1 la T1 non aumenta tanto quanto la T2 nel box2. Le RTD invece subiscono un notevole incremento; in particolare la RTD1 aumenta da 20°C a 29°C mentre la RTD2 passa da 20°C a 26,5°C. Questo incremento è dovuto alla ridotta distanza delle lampade rispetto alla prova precedente. Le UR subiscono delle diminuzioni: nel box LIMEPAINT di circa 4 punti percentuali% mentre nel box MAMMUT diminuisce del 2%. Anche in questo caso la variazione di UR è più elevata nel box2 rispetto al box1.

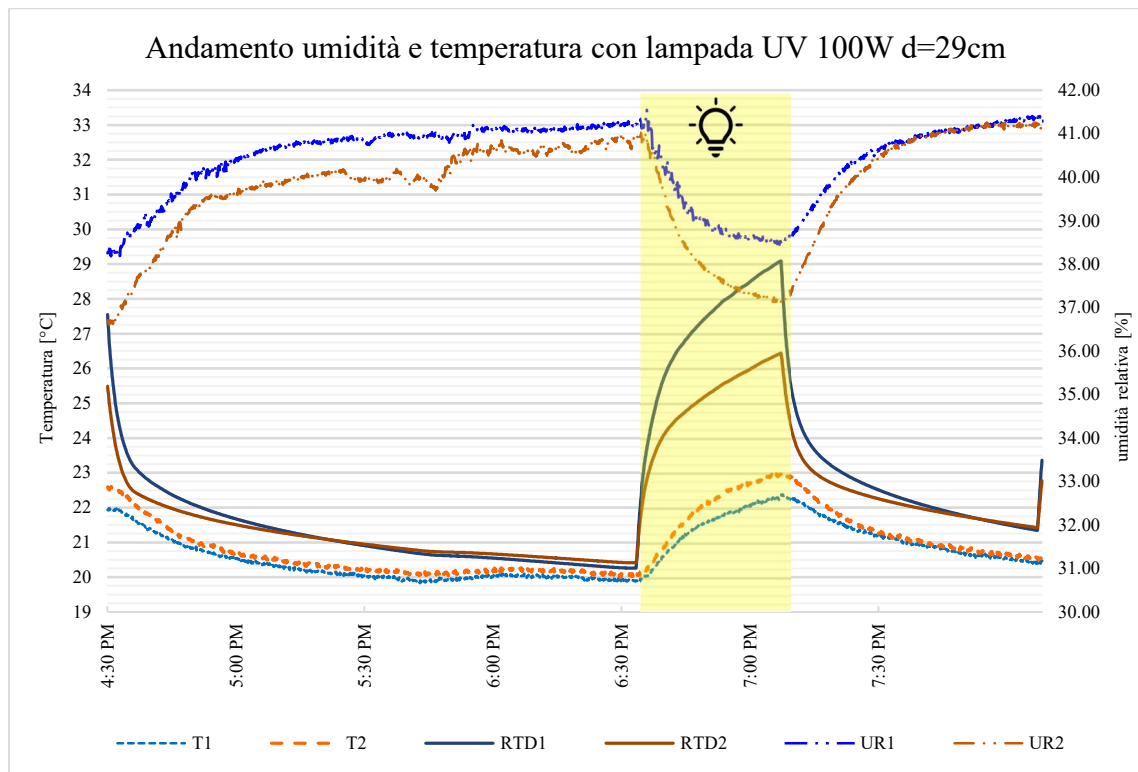


Grafico 37- Andamento temperatura e umidità lampada UV 100W
Irradianza UV = 24 W/m^2 , irradianza VIS = 90 W/m^2

Si deduce che i parametri microclimatici di temperatura e umidità relativa sono più sensibili e oscillanti nel box2 rispetto al box1 probabilmente perché la finitura MAMMUT, grazie alle sue proprietà assorbenti (moisture buffer) riesce a mitigare l'ambiente indoor rendendolo non troppo caldo e asciutto quando la temperatura ambientale aumenta e non troppo freddo umido quando la temperatura scende.

7. Osservazioni finali del monitoraggio in sito

In presenza di eventi di modifica delle condizioni di T, UR e concentrazione di VOC il sistema di monitoraggio mostra una modifica nel trend delle misurazioni rilevate dai vari sensori. Questo dimostra l'efficacia del sistema di monitoraggio usato per l'analisi dei parametri ambientali su scala pilota. Si registrano modifiche della temperatura ambientale e superficiale in presenza delle due differenti finiture, sempre più sensibili nel box con la finitura commerciale, a dimostrazione che la finitura innovativa presenta una seppur minima inerzia termica. Quando la lampada solare Ultravita è accesa, si registra un picco della T sia ambientale sia superficiale in entrambi i box. In termini di UR la finitura UNIVPM conferisce all'ambiente una maggiore inerzia igrometrica, confermando quindi la capacità di funzionare come tampone igrometrico anche su scala reale. Anche le concentrazioni VOC aumentano nei due box ma con un aumento più marcato in presenza della finitura commerciale di riferimento. Questo può essere dovuto al rilascio di VOC precedentemente adsorbito/assorbito dalle pareti interne dei box. Quando viene aumentata l'UR a ~75% si registra un picco nei valori monitorati di UR a cui corrisponde un picco anche per le concentrazioni di VOC in entrambi i box; quando l'UR viene abbassata, si abbassano siano i valori di UR monitorati sia la concentrazione di VOC in entrambi i box. Questo dimostra che i parametri ambientali modificano la risposta delle finiture in termini di adsorbimento/assorbimento degli inquinanti aerodispersi. Ovviamente, ad ogni carico di MEK all'interno dei box, segue un picco di concentrazione di VOC in entrambi i box. In ogni caso, la finitura UNIVPM mantiene all'interno del box valori inferiori di concentrazione di VOC rispetto alla finitura commerciale di riferimento per tutto il periodo di monitoraggio. Tale risultato conferma che la finitura innovativa brevettata UNIVPM è capace di adsorbire gli inquinanti aerodispersi in maniera efficace anche su scala pilota con prestazioni superiori a una finitura commerciale di riferimento.

8. Discussione

Scala laboratorio

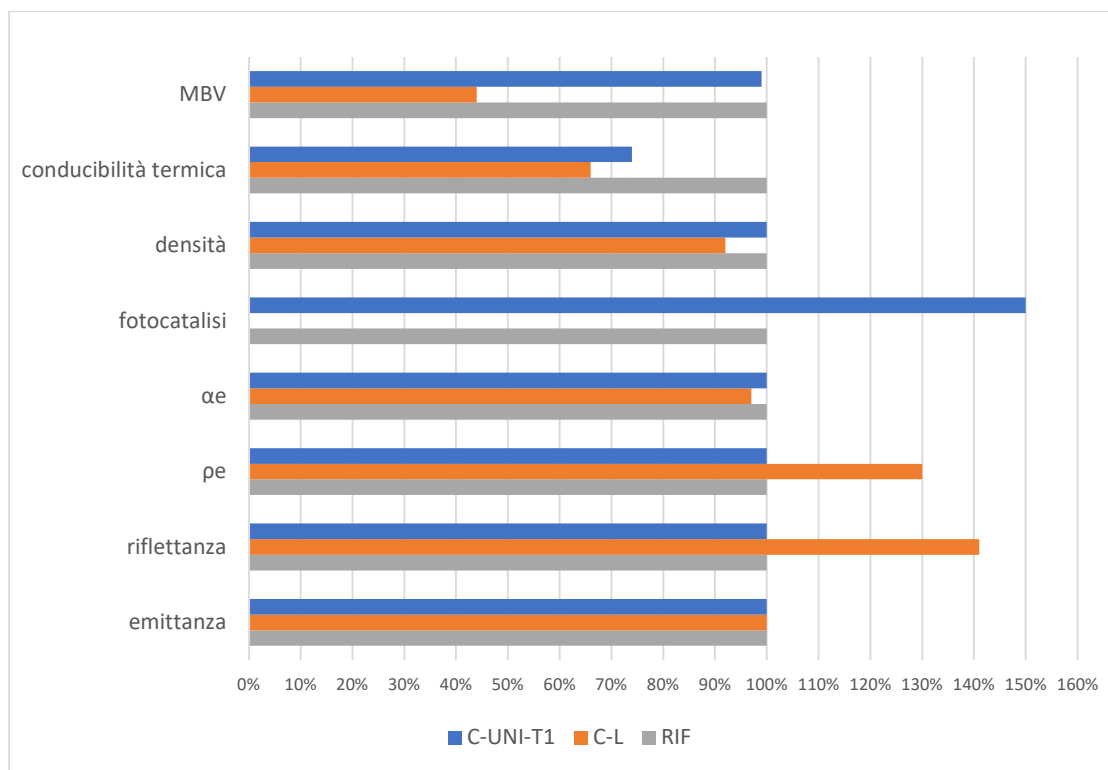


Grafico 38 - Confronti in termini % delle caratteristiche delle malte C-L e C-UNI-T1 rispetto al riferimento su scala laboratorio

Al fine di migliorare la qualità dell'aria e il comfort in maniera passiva di un ambiente confinato, nella presente tesi, si sono realizzate e studiate delle malte leggere a base di calce a basso impatto ambientale e con caratteristiche multifunzionali. Nel *grafico 38* si riportano su scala laboratorio i risultati tradotti in termini percentuali rispetto a un campione di riferimento di malta performante i cui dati sono stati tratti dalla letteratura. Si osserva che rispetto al riferimento (grigio), la malta di calce con finitura tradizionale C-L (LIMEPAINT) ha buone prestazioni ottiche (emittanza, riflettanza, rifrazione solare, assorbanza). Infatti, a parità di emittanza, la C-L (LIMEPAINT) ha elevata capacità di riflettere la radiazione incidente e ha una più bassa assorbanza. Per quanto riguarda invece le prestazioni richieste in ambienti confinati, come assorbimento dell'umidità e come catalizzatore dell'inquinamento indoor, si

hanno peggioramenti e, nel caso della fotocatalisi, non si ha alcun effetto disinquinante.

Il campione (MAMMUT) di malta leggera a base di calce a basso impatto ambientale e contenente il TiO_2 al 2% si mostra più performante rispetto al riferimento e alla C-L priva del fotocatalizzatore. In particolare, in campo ottico la C-UNI-T1 (MAMMUT) assume lo stesso comportamento del riferimento tratto dallo studio di Aïssa et al. (2011). MAMMUT ha peggiori prestazioni riguardo alla capacità di schermare la radiazione solare; la causa può essere ricondotta alla differenza cromatica, più scura rispetto alla finitura tradizionale C-L (LIMEPAINT). Ciò porta a valutare bene i vantaggi/svantaggi di un possibile impiego della finitura interna vicino a superfici vetrate quindi molto illuminate dalla radiazione solare. L'aspetto che colpisce di più, però, è legato alle proprietà che migliorano gli ambienti interni, ovvero assorbimento di umidità e di degradazione dei composti organici volatili (VOC), e che erano l'obiettivo di studio di questa tesi. La malta C-UNI-T1 (MAMMUT) ha un ottimo comportamento di moisture buffering: il suo valore è superiore al doppio di quello del campione di finitura tradizionale C-L (LIMEPAINT) ma si attesta intorno agli stessi valori dell'assorbimento del riferimento preso dalla letteratura. Riguardo invece all'azione disinquinante, la C-UNI-T1 risulta la migliore in assoluto con un abbattimento degli NO_x pari al 28% che svetta rispetto al 18% registrato per il campione di riferimento (RIF) e rispetto al contributo nullo della malta C-L (LIMEPAINT). La malta C-UNI-T1 (MAMMUT) ottempera in buona parte agli obiettivi posti in questa sperimentazione, ovvero al miglioramento delle condizioni dell'aria interna in termini di umidità e inquinamento, sfruttando la capacità di aggregati non convenzionali. Di seguito vengono confrontati i risultati in scala laboratorio di C-L (LIMEPAINT) e C-UNI-T1 (MAMMUT) con i valori ottenuti dal monitoraggio in sito su scala pilota.

Scala pilota

Lo scopo di questa tesi è quello di studiare e confrontare la capacità di rimozione passiva di una malta multifunzionale rispetto a una finitura di tipo commerciale, in uno spazio confinato e simulante l'ambiente indoor di un edificio. Dopo un'approfondita analisi in laboratorio delle proprietà concorrenti a questo studio, si è scelto di paragonare i due campioni su scala pilota a dimensione reale. Il seguente grafico mette in relazione i miglioramenti o peggioramenti percentuali della malta C-L (rappresentativa del campione commerciale) e della malta C-UNI-T1 (rappresentativa del campione innovativo) riguardo ai comportamenti igrometrico e disinguinante confrontati su scala laboratorio e su scala reale. Ciò consente di valutare se e come siano confermate le prestazioni dei materiali nel passaggio dal micro-laboratorio, facilmente controllabile, al macro-reale caratterizzato da molte più variabili difficilmente regolabili. Per quanto riguarda l'umidità, nel seguente istogramma si è scelto di tenere separate le prove laboratorio da quelle al POND in quanto le prime si basano su prova normata di NORDTEST e servono a misurare il MBV di ciascun campione di malta mentre le seconde rappresentano la diminuzione percentuale di UR registrata dai sensori nell'ambiente di ciascun box dopo il picco di 80% impostato nel set-point dell'umidificatore.

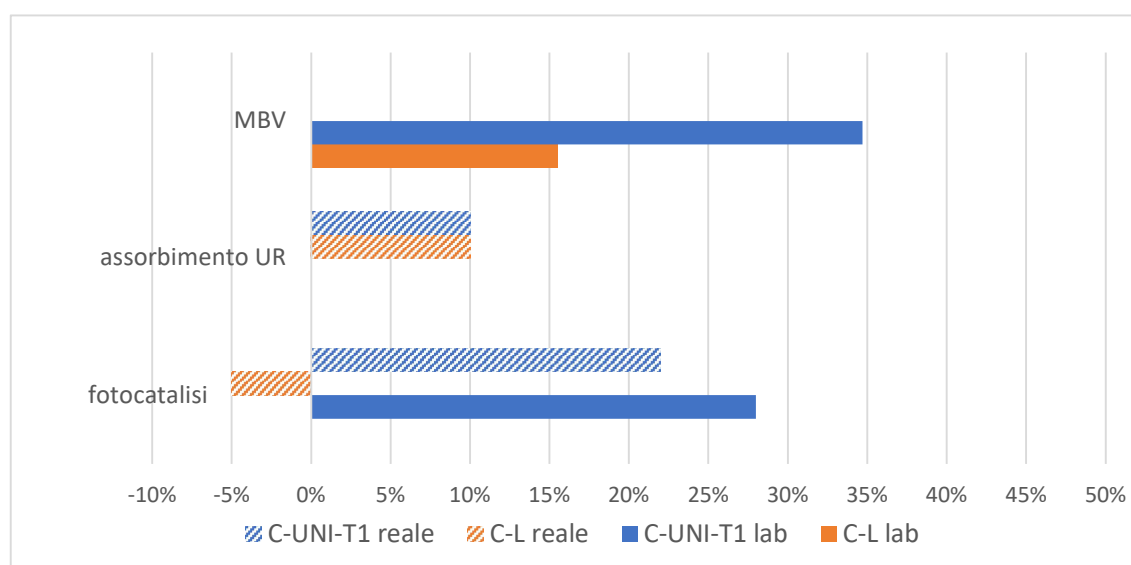


Grafico 39 - Confronto tra scala laboratorio e scala pilota delle variazioni percentuali di C-L e C-UNI-T1 rispetto al comportamento igrometrico e disinguinante

Per la fotocatalisi invece, del momento che le prove, sia in laboratorio che sul campo, hanno seguito la stessa procedura, i valori sono stati affiancati nel grafico. Dal confronto si evince che per quanto riguarda l'inerzia igrometrica, le migliori prestazioni si hanno in laboratorio, in cui l'assorbimento % dell'umidità relativa in termini di MBV viene misurato con la prova di NORDTEST che è molto più precisa: il campione di C-UNI-T1 (MAMMUT) assorbendo umidità aumenta la sua massa del 34,5% mentre il campione C-L (LIMEPAINT) aumenta del 15%. Nella simulazione di un ambiente reale questa percentuale di assorbimento è ricondotta alla variazione dei valori di umidità relativa registrata dai sensori a seguito delle situazioni di stress igrometrico effettuate ad opera degli umidificatori. Dalla situazione di picco si è osservato che i sensori registrano in entrambi i box un picco a circa 80% e nella discesa, entrambi i box giungono del giro di 2h a una UR costante del 70% ($\Delta UR \sim 10\%$). Quindi è possibile dire che su scala pilota le finiture hanno una simile inerzia igrometrica. Anche per quanto riguarda il comportamento fotocatalitico si hanno migliori prestazioni in scala laboratorio. In particolare, non si ha alcun contributo da parte della finitura tradizionale C-L che è priva di fotocatalizzatori e che oltretutto, nel passaggio a scala pilota, emette VOC nell'ambiente. La finitura innovativa C-UNI-T1 ha azione fotocatalitica che non conferma il 28% di abbattimento registrato in laboratorio, ma apporta sicuramente un miglioramento della qualità dell'aria interna.

9. Conclusioni e ricerche future

Sono stati effettuati test di laboratorio e su scala pilota per valutare la capacità di un tipo di malta leggera a base di calce a basso impatto ambientale e con caratteristiche multifunzionali capaci di migliorare passivamente il comfort e la salute interna in termini di adsorbimento degli inquinanti interni e capacità di tamponamento dell'umidità. Il campione di malta multifunzionale, costituito da un supporto di calce, è stato coperto da uno strato di finitura innovativa miscelata dall'UNIVPM e contenente gel di silice, ceneri di biomassa, TiO_2 , antiritiro e cellulosa. Il secondo campione è costituito con lo stesso supporto di calce idraulica trattata con un'idropittura commerciale. Entrambi sono stati confrontati con una malta da intonaco di riferimento presa dalla letteratura e contenente TiO_2 al 2%. I principali risultati ottenuti sono:

- Si osservano migliori proprietà ottiche nella malta C-L commerciale che consentono di schermare in parte la radiazione solare.
- La malta più leggera e con minor densità, ha una minore conducibilità termica. Materiali a bassa conducibilità termica garantiscono un elevato isolamento termico dell'edificio, permettendo un basso consumo di energia per mantenere la temperatura interna.
- La malta innovativa prodotta dall'UNIVPM mostra una maggior attività tampone rispetto a quelle tradizionali probabilmente per l'utilizzo nella miscela di gel di silice (18%) e cellulosa (1%).
- La malta contenente TiO_2 ha un buon comportamento di rimozione passiva degli inquinanti con un'efficienza del 28% su scala laboratorio e del 22% su scala pilota.

Per quanto riguarda le prospettive future:

- Le migliori prestazioni ottiche della malta C-L aprono un possibile impiego di questa finitura per applicazioni outdoor oppure indoor ma vicino ad ampie pareti vetrate che consentono elevato irraggiamento.
- Su scala reale, data la variabilità delle condizioni al contorno, si potrà effettuare una ricerca più controllata utilizzando una ventilazione artificiale che possa regolare il flusso d'aria in entrata e in uscita e garantire una più equa distribuzione della composizione dell'aria nei box, specialmente a seguito dei carichi di inquinante
- La malta C-UNI-T1 ottempera in parte agli obiettivi posti in questa sperimentazione, ovvero al miglioramento delle condizioni dell'aria interna in termini igrometrici e disinquinanti, sfruttando la capacità di aggregati non convenzionali. Per sviluppi futuri, sarà importante sperimentarne le capacità disinquinanti in ambienti reali più grandi e valutarne i costi.

10. Bibliografia e sitografia

- (1) Giosuè, Chiara, Mattia Pierpaoli, et al. 2020. "Multifunctional Lightweight Mortars for Indoor Applications to Improve Comfort and Health of Occupants: Thermal Properties and Photocatalytic Efficiency." *Frontiers in Materials* 7.
- (2) Moro, Carlos, Vito Francioso, Marina Lopez-Arias, and Mirian Velay-Lizancos. 2022. "The Impact of CO₂ Uptake Rate on the Environmental Performance of Cementitious Composites: A New Dynamic Global Warming Potential Analysis." *Journal of Cleaner Production* 375.
- (3) Nazioni Unite 2015 "Agenda-2030-Goal13", <https://sdgs.un.org/goals>
- (4) Jayasena, Amindha, Kasun Hewage, Osamah Siddiqui, and Rehan Sadiq. 2022. "Socio-Economic and Environmental Cost-Benefit Analysis of Passive Houses: A Life Cycle Perspective." *Journal of Cleaner Production* 373.
- (5) Abidi, M. et al. 2023. "Dynamics of VOCs Degradation and Bacterial Inactivation at the Interface of AgxO/Ag/TiO₂ Prepared by HiPIMS under Indoor Light." *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry* 435.
- (6) Ministero della Salute. 2015. "Sindrome Dell'edificio Malato - Sick Building Syndrome" https://Www.Salute.Gov.It/Portale/Temi/P2_6.Jsp?Id=4404&area=indor&menu

- (7) Sarkhosh, Maryam et al. 2021. "Indoor Air Quality Associations with Sick Building Syndrome: An Application of Decision Tree Technology." *Building and Environment* 188.
- (8) WHO World Health Organization. "Air Quality Guidelines by the World Health Organization (WHO) - <https://atmotube.com/atmotube-support/standards-for-indoor-air-quality-laq>."
- (9) Cascione, Valeria et al. 2020. "Comparison of Moisture Buffering Properties of Plasters in Full Scale Simulations and Laboratory Testing." *Construction and Building Materials* 252.
- (10) Ministero della Salute. 2015a. "Inquinamento Dell'aria Indoor - [https://www.salute.gov.it/portale/temi/p2_6.jsp?lingua=italiano&id=4385&area=indor&menu=vuoto#:~:Text=L'inquinamento%20indoor%20\(Indoor%20pollution,Di%20salubrit%C3%A0%20dell'aria%20stessa](https://www.salute.gov.it/portale/temi/p2_6.jsp?lingua=italiano&id=4385&area=indor&menu=vuoto#:~:Text=L'inquinamento%20indoor%20(Indoor%20pollution,Di%20salubrit%C3%A0%20dell'aria%20stessa)."
- (11) Shayegan, Zahra, Mitra Bahri, and Fariborz Haghighat. 2022. "A Review on an Emerging Solution to Improve Indoor Air Quality: Application of Passive Removal Materials." *Building and Environment* 219.
- (12) Diamanti, Maria Vittoria, Marco Ormellese, and Maria Pia Pedferri. 2008. "Characterization of Photocatalytic and Superhydrophilic Properties of Mortars Containing Titanium Dioxide." *Cement and Concrete Research* 38(11): 1349-53.
- (13) Mario Collepari. 1996. *Gli Additivi per Calcestruzzo. Come Funzionano e Come Si Impiegano*.

- (14) Aïssa, Aurélie Hadj et al. 2011. "Characterization and Photocatalytic Performance in Air of Cementitious Materials Containing TiO₂. Case Study of Formaldehyde Removal." *Applied Catalysis B: Environmental* 107(1-2): 1-8.
- (15) Giosuè, Chiara, Alessandra Mobili, et al. 2020. "Innovative Hydraulic Lime-Based Finishes with Unconventional Aggregates and TiO₂ for the Improvement of Indoor Air Quality." *Manufacturing Review* 7.
- (16) González-Sánchez, J. F. et al. 2021. "Improvement of the Depolluting and Self-Cleaning Abilities of Air Lime Mortars with Dispersing Admixtures." *Journal of Cleaner Production* 292.
- (17) Senff, L. et al. 2018. "Development of Multifunctional Plaster Using Nano-TiO₂ and Distinct Particle Size Cellulose Fibers." *Energy and Buildings* 158.
- (18) Cascione, Valeria, Daniel Maskell, Andy Shea, and Pete Walker. 2021. "The Moisture Buffering Performance of Plasters When Exposed to Simultaneous Sinusoidal Temperature and RH Variations." *Journal of Building Engineering* 34.
- (19) Mobili, Alessandra et al. 2021. "Mechanical, Durability, Depolluting and Electrical Properties of Multifunctional Mortars Prepared with Commercial or Waste Carbon-Based Fillers." *Construction and Building Materials* 283.

- (20) Huang K-C, Tsay Y-S, Lin F-M, Lee C-C, Chang J-W (2019) Efficiency and performance tests of the sorptive building materials that reduce indoor formaldehyde concentrations. PLoS ONE 14 (1): e0210416
- (21) Hassan, H. Z., and A. A. Mohamad. 2012. "A Review on Solar-Powered Closed Physisorption Cooling Systems." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16(5).
- (22) Zuraimi, M. S. et al. 2018. "Performance of Sorption- and Photocatalytic Oxidation-Based Indoor Passive Panel Technologies." *Building and Environment* 135.
- (23) F. Tittarelli, C. Giosuè, A. Mobili, M.L. Ruello "Influence of binders and aggregates on VOCs adsorption and moisture buffering activity of mortars for indoor applications" *Cement Concr. Compos.*, 57 (2015), pp. 75-83
- (24) N.J. Krou, I. Batonneau-Gener, T. Belin, S. Mignard, I. Javierre, I. Dubois-Brugger, M. Horgnies "Reactivity of volatile organic compounds with hydrated cement paste containing activated carbon" *Build. Environ.*, 87 (2015), pp. 102-107
- (25) M. Horgnies, I. Dubois-Brugger, E.M. Gartner "NO_x de-pollution by hardened concrete and the influence of activated charcoal additions" *Cement Concr. Res.*, 42 (10) (2012), pp. 1348-1355
- (26) Colleparidi Mario, Colleparidi Silvia, Troli Roberto "Il nuovo calcestruzzo" quinta edizione, TREVISOSTAMPA

11. Allegati

SCHEDA TECNICA UMIDIFICATORE UHW MEDISANA**NOME PRODOTTO**

Umidificatore UHW

DIMENSIONI PRODOTTO

26,5x20x33 cm

PESO PRODOTTO

2 Kg

PRODUTTORE

Medisana

POTENZA PRODOTTO

32 Watt

ALIMENTAZIONE

220-240V/50Hz

LUNGHEZZA CAVO

150 cm

CONTENITORE ACQUA

4.200 ml

**MAX CAPACITA' DI
APPANNAMENTO**

230 ml/h

TEMPO DI FUNZIONAMENTO

A seconda dell'impostazione

PCMini52

Trasmittitore mini per la misura di umidità relativa e temperatura

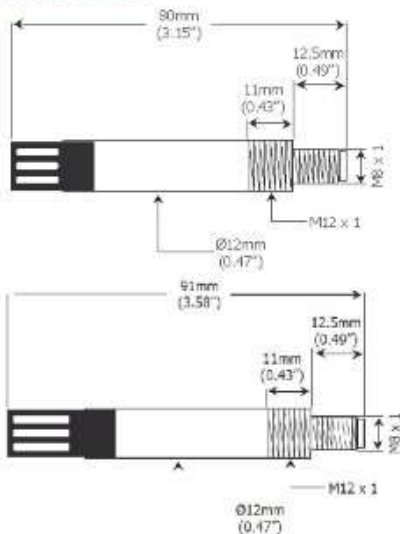
Il controllo del microprocessore e la calibrazione su più punti consentono al trasmettitore della serie PCMini52 di avere delle prestazioni eccellenti in termini di accuratezza e linearità. Il trasmettitore di dimensioni ridotte, fornisce due uscite analogiche configurabili a scelta tra temperatura, umidità relativa, dew point o umidità assoluta.



Caratteristiche

- Uscite analogiche in tensione
- Uscita in %UR, umidità assoluta calcolata, punto di rugiada o temperatura del bulbo umido + temperatura
- Linearità eccellente, (μP) con compensazione della temperatura tramite microprocessore
- Consumo bassissimo di energia, tempi rapidi di stabilizzazione
- Dimensioni con filtro corto: L = 80 mm
Dimensioni con filtro lungo: L = 91 mm
- Plastica o acciaio inox

Dimensioni



Specifiche Tecniche

Prestazioni

Campo di misura (UR)	0...100 % UR
Campo di misura (T)	da -20 °C a +80 °C
Accuratezza Umidità a 23 °C	< ± 2 %UR (dal 10 al 90 % UR)
Accuratezza Temperatura a 23 °C	$\pm 0,2$ °C
Stabilità – Sensore UR	± 1 % UR/anno
Tempo di risposta – Sensore UR	<10 sec tipica (per il 90 % del cambiamento)

Ingressi/Uscite elettriche

Opzioni segnale d'uscita	0-1, 0-5, 0-10 V
Tensione d'alimentazione	14-35 V DC (per 0-5/10 V uscita) 6-35 V DC (per 0-1 V uscita)
Consumo corrente	4 mA su un cavo di tensione standard
Marchio CE	Certificato

Condizioni operative

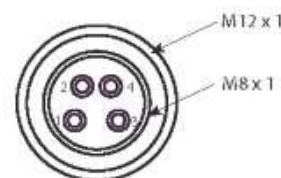
Temperatura operativa	da -30 °C a +85 °C
Elemento Sensibile	da -30 °C a +85 °C
Custodia	da -40 °C a +85 °C
Stoccaggio	da -40 °C a +85 °C

Specifiche meccaniche

Grado di protezione	IP65 (NEMA livello 4)
Materiale custodia	Plastica od acciaio inox
Dimensioni	L=80 mm, ϕ =12 mm L=91 mm, ϕ =12 mm – K9, K11 Opzione filtro
Filtro	PVDF / HDPE / maglia / sinterizzato (opzionale)
Peso	10 g
Connessioni elettriche	4 pin, connettore M8

Connessioni Elettriche

Cavo		Pin
Marrone	Tensione d'alimentazione V+	1
Bianco	Uscita UR o dew point o umidità assoluta	2
Blu	GND	3
Nero	Uscita Temperatura	4






Michell Italia Srl Via Magenta 77, Edificio 6, Rho, Milano, 20017 Italia

T. [39] 02 4047194, F. [39] 02 40010565, Email: it.info@michell.com, Web: www.michell.com/it

Michell Instruments adotta un programma di aggiornamento continuo che a volte può richiedere la modifica delle specifiche senza preavviso.

Revisione no: PCMini52_97176_V6_IT_0921

Specifications

Feature / Series	Series 900	Series 930	FM SM70
Applications	Ozone generator control, indoor air quality, real-time network monitoring, health and safety and process control.	Industrial applications for gas leak detection, real-time network monitoring, health and safety and process control.	Ozone monitor for real-time network monitoring, health and safety and process control.
Measurement units	Gas: ppm or mg/m ₃ Optional: Humidity: % a Temperature: °C or °F		Gas: ppm
Reading functions	Instant, minimum, maximum, average		Instant
Sensor head type	 Sensor head Interchangeable	 Sensor head Removable / Replaceable	 Sensor head Removable / Replaceable
Sampling method	Active sampling via internal sensor head fan		Active sampling via sensor board fan
Analog output	4-20 mA (opto-isolated), 10-30 Vdc	4-20 mA (opto-isolated), 12-24 Vdc	0-5 Vdc (LZ sensor board), 0-1.5 Vdc (UZ sensor board)
External signal type	Transistor output (4) (24 Vdc at 150 mA max)		Relay output (24 Vdc; 5 A max.)
External signal functions	Low Alarm High Alarm Control Diagnostics		Factory configured
External signal input	Standby toggle		
Connectors	Screw type		
Monitor Identification (ID)	1 (Default) User configurable from 1 to 255		
Alarm set points	User configurable Low Alarm High Alarm		Factory configured single point
Control set point	User configurable Low Alarm High Alarm		Factory configured
Communication	RS-485 (Aeroqual proprietary protocol)		RS232 and RS485 (Aeroqual proprietary protocol)
Software	Free PC Configuration software and logging Link data to a specific location and monitor (Data cable required)		
Interface (optional)	RS-485 to USB cable		RS-485 and RS-232
Power (user supplied)	Regulated 12 Vdc, 800 mA	24 Vdc, 500 mA (range 22-24 Vdc)	12 Vdc; 800 mA; Plug-in Vdc power adaptor supplied
Monitor base/enclosure material and rating	Polycarbonate IP20 NEMA 1 equivalent	Polycarbonate IP41 NEMA 2 equivalent	Flame resistant PS IP20 NEMA 1 equivalent
Size (with sensor head) (L x W x H)	64 H x 130 Ø mm; 2½ x 5½ Ø in	180 x 110 x 90 mm 7¼ x 4¾ x 3½ in	130 x 94 x 57 mm 5¼ x 3¾ x 2¼ in
Weight (Incl. Sensor)	< 200 g; < 7 oz	< 850 g; < 30 oz	270 g; 9.5 oz (excludes AC power adaptor)
Environmental operating conditions	0°C to 40°C 32°F to 104°F		
Approvals	Part 15 of FCC Rules, EN 61000-6-3: 200, EN 61000-6-3: 2001		

Optional accessories



Temperature/ RH Sensor
FM TRHO1



Monitor RS485 to USB Cable
AS R17






Integrated display (930 Only)
FM DISP01



Biren & strobe (930 Only)
AS R23D



Specifications

Feature / Series	Series 900	Series 930	FM SM70
Applications	Ozone generator control, indoor air quality, real-time network monitoring, health and safety and process control.	Industrial applications for gas leak detection, real-time network monitoring, health and safety and process control.	Ozone monitor for real-time network monitoring, health and safety and process control.
Measurement units	Gas: ppm or mg/m ₃ Optional: Humidity: % a Temperature: °C or °F		Gas: ppm
Reading functions	Instant, minimum, maximum, average		Instant
Sensor head type	 Sensor head Interchangeable	 Sensor head Removable / Replaceable	 Sensor head Removable / Replaceable
Sampling method	Active sampling via internal sensor head fan		Active sampling via sensor board fan
Analog output	4-20 mA (opto-isolated), 10-30 Vdc	4-20 mA (opto-isolated), 12-24 Vdc	0-5 Vdc (LZ sensor board), 0-1.5 Vdc (UZ sensor board)
External signal type	Transistor output (4) (24 Vdc at 150 mA max)		Relay output (24 Vdc; 5 A max.)
External signal functions	Low Alarm High Alarm Control Diagnostics		Factory configured
External signal input	Standby toggle		
Connectors	Screw type		
Monitor Identification (ID)	1 (Default) User configurable from 1 to 255		
Alarm set points	User configurable Low Alarm High Alarm		Factory configured single point
Control set point	User configurable Low Alarm High Alarm		Factory configured
Communication	RS-485 (Aeroqual proprietary protocol)		RS232 and RS485 (Aeroqual proprietary protocol)
Software	Free PC Configuration software and logging Link data to a specific location and monitor (Data cable required)		
Interface (optional)	RS-485 to USB cable		RS-485 and RS-232
Power (user supplied)	Regulated 12 Vdc, 800 mA	24 Vdc, 500 mA (range 22-24 Vdc)	12 Vdc, 800 mA; Plug-in Vdc power adaptor supplied
Monitor base/enclosure material and rating	Polycarbonate IP20 NEMA 1 equivalent	Polycarbonate IP41 NEMA 2 equivalent	Flame resistant PS IP20 NEMA 1 equivalent
Size (with sensor head) (L x W x H)	64 H x 130 Ø mm; 2½ x 5¼ Ø in	180 x 110 x 90 mm 7¼ x 4¼ x 3½ in	130 x 94 x 57 mm 5¼ x 3¾ x 2¼ in
Weight (Incl. Sensor)	< 200 g; < 7 oz	< 850 g; < 30 oz	270 g; 9.5 oz. (excludes AC power adaptor)
Environmental operating conditions	0°C to 40°C 32°F to 104°F		
Approvals	Part 15 of FCC Rules, EN 61000-6-3: 200, EN 61000-6-1: 2001		

Optional accessories



Temperature/ RH Sensor
FM TRH01



Monitor RS485 to USB Cable
AS R17



Integrated display (930 Only)
FM DISP01



Siren & strobe (930 Only)
AS R23D



UV-Hochdruckstrahler UV-High Pressure Lamp

ULTRA-VITALUX 300-280 E27 EAN 4050300003313

Elektrische Größen / electrical data

Leistungsaufnahme <i>lamp power</i>	(W)	300
Betriebsspannung <i>operating voltage</i>	(V)	230
Strahlerstrom <i>lamp current</i>	(A)	1,3

Strahlungsphysikalische Größen / spectral data

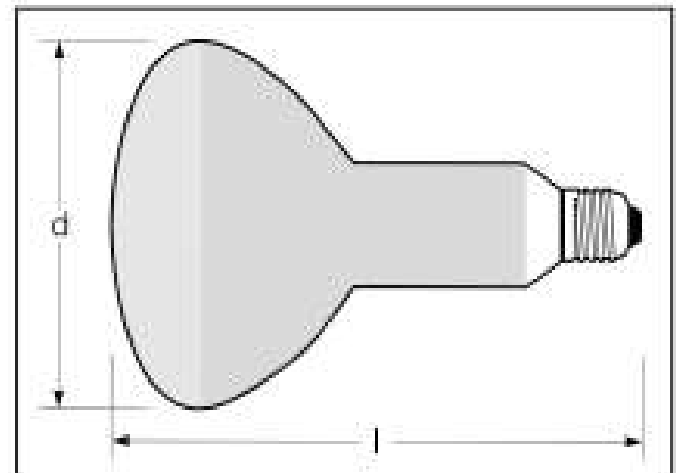
UVA-Bestrahlungsstärke (Abstand 0,5m) (W/m ²) <i>UVA-irradiance (0,5m distance)</i>		13,6
UVB-Bestrahlungsstärke (Abstand 0,5m) (W/m ²) <i>UVB-irradiance (0,5m distance)</i>		3,0
Ausstrahlwinkel <i>beam angle in degrees</i>	(°)	30
Nutzbrenndauer <i>economic life</i>	(h)	1000

Betriebsbedingungen / operating conditions

Brennlage <i>burning position</i>		beliebig <i>any</i>
Max. Sockelrandtemperatur <i>max. base edge temperature</i>	(°C)	210
Vorschaltgerät <i>ballast</i>		integriert <i>integrated</i>
Zündgerät <i>ignitor</i>		integriert <i>integrated</i>

Bemerkung / notice

Die technischen Daten sind Nennwerte. Einzelexemplare können Abweichungen von bis zu 10% aufweisen.
The technical data given are nominal values. Variations up to 10% with single lamps are possible.



Abmessungen / geometric data

Gesamtlänge <i>overall length</i>	l (mm)	185
Durchmesser <i>diameter</i>	d (mm)	127
Sockel <i>base</i>		E 27

Anwendungen / applications

Medizin, Medizintechnik, Härtung, Polymerisation, Materialprüfung
Medicine, Medical engineering, Curing, Polymerisation, Materials testing

Spektrale Strahlungsverteilung / spectral radiation distribution

