



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea triennale in Ingegneria Civile e Ambientale

**INNOVAZIONI NELLA QUALITÀ DELL'ARIA INTERNA:
SOSTENIBILITÀ E TECNOLOGIE DI FILTRAGGIO**

INNOVATIONS IN INDOOR AIR QUALITY: SUSTAINABILITY AND FILTER
TECHNOLOGIES

Relatrice:

Prof.ssa Maria Letizia Ruello

Tesi di Laurea di:

Giulia Bucciarelli

Correlatrice:

Natalia Czerwinska

Anno Accademico 2023-2024

Sommario

<i>Riassunto</i>	1
<i>1. INTRODUZIONE</i>	3
1.1 Indoor Air Quality	3
1.2 Inquinanti	6
1.2.1 Particolato (PM).....	8
1.2.2 Ossidi di Azoto (NO _x)	9
1.2.3 Composti Organici Volatili (COV).....	10
<i>2. FILTRI ELETTROFILATI</i>	12
2.1 Elettrofilatura	12
2.2 Biopolimeri	15
2.3 Sviluppo dei filtri	17
2.4 Caratterizzazione morfologica con microscopio elettronico a scansione (SEM).....	22
2.4.1 Risultati della morfologia	24
2.4.2 Discussione della morfologia.....	29
2.5 Valutazione dell'efficienza di filtrazione	30
2.5.1 Risultati di efficienza filtrante	33
2.5.2 Andamento della concentrazione di PM nel tempo	35
2.5.3 Discussione dell'efficienza filtrante	37
<i>3.FOTOCATALIZZATORI</i>	39
3.1 Rimozione di NO _x	39
3.1.1 Strumentazione e Metodologia di Analisi dei NO _x	40
3.1.2 Procedura sperimentale.....	41
3.1.3 Risultati test di fotocatalisi	47
3.1.4 Discussione finale proprietà fotocatalitiche.....	49
3.2 Rimozione di COV	50
3.2.1 Caratteristiche del setup sperimentale	51
3.2.2 Risultati e Discussione.....	52
3.2.3 Considerazioni finali.....	54
<i>4. CONCLUSIONI</i>	56
<i>BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA</i>	59
<i>Indice delle tabelle</i>	60
<i>Indice delle figure</i>	60

Riassunto

L'importanza delle problematiche relative alla qualità dell'aria interna ha assunto sempre più rilievo in questi ultimi anni perché la maggior parte della popolazione dei paesi industrializzati trascorre fino al 90% del proprio tempo in ambienti confinati. La letteratura scientifica internazionale ha dimostrato che la qualità dell'aria interna (IAQ – Indoor Air Quality) ha riflessi importanti sulla salute e sul benessere umano. I principali contribuenti all'inquinamento dell'aria interna includono il Particolato (PM – Particulate Matter) e gli inquinanti gassosi come i composti organici volatili (COV) o gli ossidi di azoto (NO_x), che rappresentano un problema considerevole sia per l'ambiente che per gli esseri umani.

Di conseguenza è fondamentale agire alla radice del problema riducendo al massimo l'origine degli inquinanti dell'aria interna, in particolare quelli di origine antropica, ma anche identificando sistemi di filtraggio che migliorano il IAQ.

Questa rassegna presenta una panoramica del processo di elettrofilatura e della caratterizzazione delle nanofibre, illustrando le tecnologie e i materiali impiegati per lo sviluppo di filtri innovativi. Vengono inoltre trattati i temi della gestione degli inquinanti gassosi, quali ossidi di azoto e composti organici

volatili, con particolare attenzione alle tecnologie applicate e ai metodi sperimentali utilizzati per la loro analisi.

1. INTRODUZIONE

1.1 Indoor Air Quality

Nella ricerca di creare ambienti costruiti più sani per gli occupanti, la qualità dell'aria interna è emersa come un fattore cruciale. Questo crescente interesse per l'argomento è una conseguenza della recente comprensione del ruolo chiave che la qualità dell'aria interna svolge per la salute umana.

L'inquinamento indoor, infatti, rappresenta una delle principali preoccupazioni ambientali per la salute umana, poiché la maggior parte della popolazione trascorre fino al 90% del proprio tempo in ambienti chiusi, quali abitazioni, uffici, scuole e mezzi di trasporto. L'aria negli spazi confinati può contenere concentrazioni di inquinanti anche cinque volte superiori rispetto all'esterno, a causa della combinazione di fonti inquinanti interne, ventilazione insufficiente e scarsa consapevolezza dei rischi associati. Gli inquinanti indoor includono composti organici volatili, particolato, ossidi di azoto, monossido di carbonio (CO) e agenti biologici come muffe e batteri.

La qualità dell'aria interna è influenzata sia da fonti di inquinamento esterne, che penetrano negli ambienti chiusi, sia da fonti interne, come materiali da costruzione, arredi, attività umane e sistemi di riscaldamento e raffreddamento.

I rischi associati a un'aria di scarsa qualità includono irritazioni sensoriali, problemi respiratori, malattie cardiovascolari e, in alcuni casi, effetti cancerogeni. L'Organizzazione Mondiale della Sanità (OMS) stima che l'inquinamento indoor contribuisca a milioni di decessi ogni anno, aggravando condizioni croniche preesistenti e aumentando la probabilità di sviluppare nuove patologie. In Europa, direttive come la 2008/50/CE e la Direttiva 2010/31/UE sul rendimento energetico degli edifici hanno sottolineato la necessità di affrontare questa problematica, promuovendo soluzioni per migliorare la qualità dell'aria interna, in sinergia con la regolamentazione per la riduzione degli inquinanti atmosferici esterni.

Per ambienti indoor si intendono gli ambienti confinati di vita e di lavoro non industriali, quelli adibiti a dimora, svago, lavoro e trasporto [Accordo del 27/09/2001 tra Ministero della salute, regioni e province autonome].

Nello specifico:

- le abitazioni,
- gli uffici pubblici e privati,
- le strutture comunitarie (ospedali, scuole, caserme, alberghi, banche, etc.),
- locali destinati ad attività ricreative e/o sociali (cinema, bar, ristoranti, negozi, strutture sportive)

- mezzi di trasporto pubblici e/o privati (auto, treno, aereo, nave, etc.).

Circa 2,3 miliardi di persone in tutto il mondo (circa un terzo della popolazione mondiale) cucinano utilizzando fuochi aperti o stufe inefficienti alimentate da cherosene, biomassa (legno, sterco animale e scarti agricoli) e carbone, che contaminano l'ambiente. L'inquinamento atmosferico domestico è responsabile di circa 3,2 milioni di morti all'anno (dati 2020), di cui oltre 237.000 bambini di età inferiore ai 5 anni. Gli effetti combinati dell'inquinamento atmosferico ambientale e quello domestico sono associati a 6,7 milioni di morti premature ogni anno.

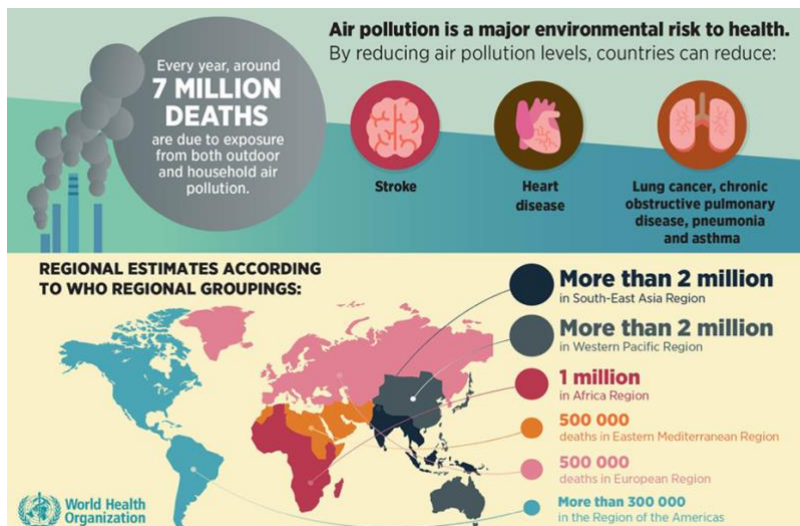


Figura 1. Morti globali per inquinamento atmosferico.

Secondo la Società Italiana di Medicina Ambientale (Sima) l'Italia è prima in Europa per morti da inquinamento atmosferico, con circa 80mila decessi prematuri all'anno. *“Gli effetti diretti dell'inquinamento sulla salute umana interessano diversi apparati ed organi – spiega il presidente Alessandro Miani – Le patologie dell'apparato cardiovascolare rappresentano la prima causa di morte in Italia (Eventi coronarici e Infarto Miocardico Acuto, 9.000 casi/anno – Ictus cerebrali, 12.000 casi/anno), seguiti dalle patologie dell'apparato respiratorio (7.000 decessi prematuri/anno)”*.

1.2 Inquinanti

Alcuni inquinanti indoor possono provenire dall'esterno e sono legati all'inquinamento atmosferico, ma la maggior parte di essi sono prodotti all'interno degli edifici stessi. Le principali fonti di inquinamento indoor sono le attività umane, i materiali da costruzione, gli arredi e i condizionatori. La loro concentrazione può variare nel tempo e dipende dalla natura della sorgente, dalla ventilazione, dalle abitudini e dalle attività svolte dagli occupanti negli ambienti interessati.

Tra le fonti di inquinanti più comuni troviamo il fumo di tabacco e i prodotti di combustione di combustibili domestici quali nafta e cherosene, ma anche carbone e legna. Altre possibili fonti di inquinamento sono i prodotti per la

pulizia e la manutenzione della casa, i prodotti antiparassitari, le colle, gli adesivi e i solventi. Sostanze nocive possono essere rilasciate da collanti o solventi utilizzati per la messa in opera delle moquette e nei mobili. Anche le stampanti, i plotter e le fotocopiatrici presenti negli uffici possono determinare emissioni di sostanze inquinanti. Non va sottovalutata la presenza di residui di amianto utilizzato in passato per la coibentazione e nei materiali da costruzione e che può essere ancor oggi rilasciato negli ambienti indoor.



Figura 2. Fonti di inquinamento indoor.

Gli inquinanti possono suddividersi in tre categorie:

1. chimici (monossido di carbonio, biossido di azoto, biossido di zolfo, benzene, ozono, particolato, formaldeide, COV, ecc.);
2. biologici (batteri, pollini, muffe, acari e gas metabolici);
3. fisici (amianto e radon).

L'idea di fondo è che la comprensione dei rischi di queste sostanze rappresenti il primo passo per tracciare le azioni necessarie a evitare e ridurre il loro impatto avverso sulla salute.

1.2.1 Particolato (PM)

Il particolato (PM) è una miscela complessa di particelle solide e liquide sospese nell'aria, classificate in base al diametro aerodinamico. Le due frazioni normate per legge sono il PM10 e il PM2.5. Il PM10 rappresenta la frazione di particelle che possono essere raccolte con un sistema di selezione che ha un'efficienza del 50% per particelle con un diametro aerodinamico di 10 μm . Analogamente per il PM2.5. Negli ambienti indoor, il particolato può provenire sia da fonti esterne, come il traffico e le emissioni industriali, sia da fonti interne, quali la cottura dei cibi, il fumo di sigaretta, l'uso di incenso e candele, nonché l'abrasione di superfici e materiali.

Le particelle più fini, come PM2.5, sono particolarmente preoccupanti per la salute, in quanto possono penetrare profondamente nel sistema respiratorio e raggiungere il flusso sanguigno. Gli studi dimostrano che l'esposizione cronica al particolato fine è associata a un aumento del rischio di malattie cardiovascolari, ictus, broncopneumopatie croniche e cancro ai polmoni.

In Italia, la normativa sulla qualità dell'aria indoor è meno sviluppata rispetto a quella per gli ambienti esterni. Tuttavia, documenti come il Rapporto ISS del 2020 sulla qualità dell'aria domestica sottolineano la necessità di un monitoraggio più rigoroso del particolato indoor, soprattutto nelle scuole e negli ospedali. Strategie come l'utilizzo di filtri ad alta efficienza e l'adozione di sistemi di ventilazione meccanica controllata sono essenziali per limitare l'esposizione al PM negli spazi chiusi.

1.2.2 Ossidi di Azoto (NO_x)

Gli ossidi di azoto (NO_x), che comprendono il monossido di azoto (NO) e il biossido di azoto (NO₂), sono gas altamente reattivi emessi durante i processi di combustione, come l'uso di fornelli a gas, caminetti, caldaie e sistemi di riscaldamento a combustione. Il NO₂, in particolare, è noto per i suoi effetti irritanti sulle vie respiratorie e per la sua capacità di aggravare condizioni come l'asma e la bronchite cronica.

Negli ambienti indoor, le concentrazioni di NO_x possono aumentare significativamente in presenza di ventilazione inadeguata, specialmente durante i mesi invernali, quando l'uso di sistemi di riscaldamento a gas è più frequente. Le direttive europee, come la Direttiva 2008/50/CE, stabiliscono limiti rigorosi per il NO₂ negli ambienti esterni, ma l'applicazione di queste

normative agli ambienti chiusi è ancora in fase di sviluppo in molti Stati membri.

Studi recenti suggeriscono che la riduzione delle concentrazioni di NO_x negli ambienti indoor può essere raggiunta attraverso l'uso di dispositivi di ventilazione efficaci e la transizione verso sistemi di riscaldamento più puliti, come le pompe di calore elettriche. La sensibilizzazione della popolazione sui rischi associati agli ossidi di azoto e l'adozione di tecnologie di monitoraggio sono strumenti fondamentali per proteggere la salute negli spazi chiusi.

1.2.3 Composti Organici Volatili (COV)

I composti organici volatili (COV) sono un'ampia classe di sostanze chimiche che evaporano facilmente a temperatura ambiente e che comprendono idrocarburi alifatici, aromatici e clorurati, aldeidi, terpeni e chetoni. Tra i principali COV presenti negli ambienti indoor, la formaldeide è una delle più rilevanti per i suoi effetti irritanti e potenzialmente cancerogeni. Altri composti comuni includono benzene, toluene, xileni e limonene, spesso associati a prodotti per la pulizia, vernici, colle e materiali da costruzione.

Questi composti vengono emessi da fonti interne come mobili, tappeti, pannelli di compensato, pitture e prodotti di consumo, ma anche da fonti esterne, quali il traffico e le attività industriali, che penetrano all'interno degli edifici. La

concentrazione di COV negli ambienti chiusi tende ad aumentare in condizioni di scarsa ventilazione o durante le stagioni fredde, quando le finestre vengono aperte meno frequentemente.

L'esposizione prolungata ai COV può causare irritazione agli occhi, al naso e alla gola, nonché mal di testa, nausea e affaticamento. In alcuni casi, sono stati rilevati effetti a lungo termine come danni epatici, renali o al sistema nervoso centrale. La regolamentazione europea e nazionale, come la Direttiva 2018/844/UE, ha introdotto linee guida per limitare l'uso di materiali edili contenenti COV e promuovere sistemi di ventilazione più efficaci per ridurre la concentrazione di tali inquinanti negli edifici.

2. FILTRI ELETTROFILATI

I filtri sono dispositivi ampiamente impiegati per la cattura delle particelle, rappresentando una delle soluzioni più efficaci per migliorare la qualità dell'aria negli ambienti chiusi.

In questa prima parte di lavoro analizzeremo i parametri di produzione, la morfologia delle fibre e l'efficienza di filtrazione di filtri prodotti utilizzando polimeri a minor impatto ambientale e mediante la tecnica dell'elettrofilatura.

2.1 Elettrofilatura

L'elettrofilatura (o electrospinning) è un processo produttivo ad alta efficienza, basato su principi elettrodinamici, impiegato sia nell'industria che nella ricerca laboratoriale per creare fibre con diametri estremamente ridotti, generalmente inferiori al micron, fino ad arrivare a pochi nanometri. Per trattenere particelle molto fini, come quelle del PM2.5 (particolato fine) o ancora più piccole, come PM1, PM0.5 e PM0.3, è necessario utilizzare sistemi di filtrazione dell'aria appositamente progettati, come le nanofibre, che hanno diametri nell'ordine dei nanometri. L'elettrofilatura è la tecnologia più comunemente adottata per la produzione di nanofibre.

In termini di flessibilità, questa tecnologia permette la produzione continua di fibre a partire da materiali polimerici, che possono essere trasformati in uno stato fluido ad alta viscosità tramite fusione (grazie al calore) o dissoluzione in specifici solventi. Il processo si basa sul flusso e sull'estensione rapida di una soluzione polimerica carica elettricamente, che viene sottoposta ad alte tensioni. Il getto polimerico generato viene accelerato e stirato da un campo elettrostatico esterno e, mentre si sposta verso il collettore, si assottiglia. Durante questo tragitto, il solvente evapora, facendo solidificare e depositare le nanofibre solide su un substrato posto sul collettore.

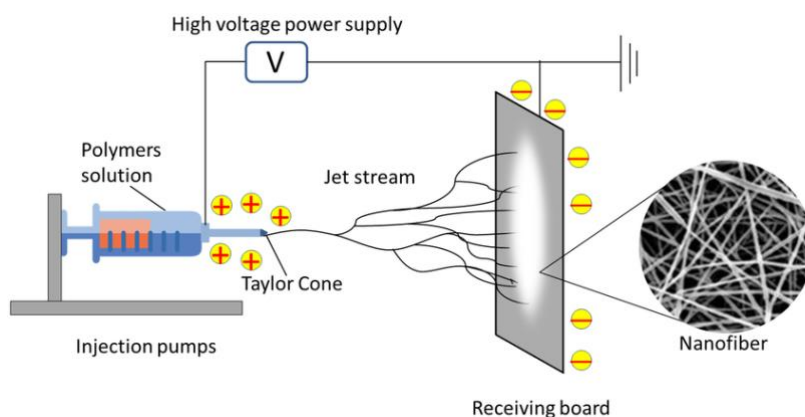


Figura 3. Processo schematico dell'electrospinning.

Il processo di elettrofilatura si basa sui seguenti componenti:

- un sistema di regolazione del flusso (tipicamente una pompa volumetrica),

- una siringa (in vetro o in plastica) contenente il materiale da elettrofilare,
- un elettrodo in contatto con la soluzione (tipicamente l'ago della siringa),
- un generatore di alta tensione (collegato all'elettrodo),
- un collettore metallico.

La siringa, riempita con la soluzione polimerica, viene flussata tramite la pompa volumetrica ad una velocità relativamente bassa e costante (nell'ordine di pochi ml/h); la pompa garantisce un flusso costante con un tasso prestabilito. Alla siringa è montato un ago in acciaio inossidabile molto sottile, con un diametro interno nell'ordine delle centinaia di micrometri, che funge anche da elettrodo in diretto contatto con la soluzione. Il generatore di tensione impartisce un elevato voltaggio (operante solitamente tra i 5 e i 30 kV) direttamente all'ago. Quando il campo elettrico applicato è sufficientemente elevato per superare la tensione superficiale delle gocce di soluzione, il getto caricato viene filato sul collettore metallico, contro elettrodo collegato alla messa a terra. Il substrato sul quale vengono raccolte le fibre elettrofilate viene solitamente messo in contatto con il controelettrodo.

Il filtro viene proiettato in una lastra di alluminio sovrapposta al collettore e, successivamente, viene da questa separato.

Quello che si ricava sono dei campioni di forma circolare che verranno poi testati nella prova di filtrazione.

2.2 Biopolimeri

I polimeri sono macromolecole costituite da lunghe catene di monomeri, che possono essere naturali o sintetici. I polimeri sintetici, come il polietilene, il polipropilene o il poliestere, sono ampiamente utilizzati in numerosi settori industriali grazie alla loro versatilità, resistenza e costi contenuti. Tuttavia, questi materiali derivano principalmente da risorse fossili e hanno un impatto ambientale significativo, a causa della difficoltà di smaltimento e del loro effetto negativo sull'ecosistema, soprattutto sotto forma di microplastiche.

I biopolimeri, al contrario, sono polimeri derivati da fonti rinnovabili, come piante, alghe o altre biomasse naturali, e possono essere biodegradabili o facilmente riciclabili. La biodegradazione è un processo di decomposizione naturale irreversibile, il cui risultato finale è la modificazione completa delle proprietà e della struttura del materiale originario. Una volta che la biodegradazione giunge al termine, le sostanze di partenza saranno state

trasformate negli elementi chimici di base che le compongono: acqua, anidride carbonica e sali minerali.

Tra i biopolimeri più conosciuti ci sono l'acido polilattico (PLA), il poliacido 3-idrossibutirrico (PHA) e la cellulosa, che sono sempre più utilizzati come alternative ecologiche ai polimeri sintetici. La principale differenza tra polimeri e biopolimeri risiede nella loro origine e nelle loro proprietà ecologiche: i biopolimeri sono progettati per ridurre l'impatto ambientale, essendo prodotti da risorse rinnovabili e, in molti casi, completamente biodegradabili.

L'uso di biopolimeri per la produzione di filtri non solo promuove un'alternativa più ecologica, ma contribuisce anche a sostenere un'economia circolare, dove i materiali sono riciclati o riutilizzati, favorendo la conservazione delle risorse naturali. In questa sperimentazione i biopolimeri che abbiamo utilizzato sono l'acido polilattico (PLA) e una resina naturale (colofonia).

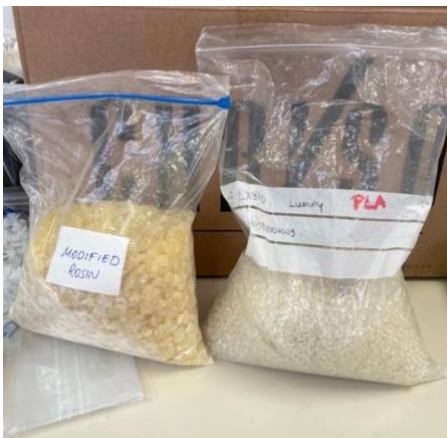


Figura 4. Materiali utilizzati in laboratorio.

2.3 Sviluppo dei filtri

La soluzione è stata preparata utilizzando un agitatore magnetico ed è pronta per l'elettrospinning quando il polimero è completamente disciolto nel solvente. Qualora il polimero sedimenti, è necessario riporre nuovamente il becher sull'agitatore magnetico.



Figura 5. Agitatore magnetico.

In particolare, abbiamo preparato soluzioni a base di colofonia (resina) grezza o di colofonia modificata e PLA disciolti in acetone.

Aumentando la percentuale di polimero, aumenta anche la viscosità della soluzione. Per garantire una miscelazione più efficace e omogenea, la soluzione veniva agitata sia con un agitatore magnetico che con un bagno a ultrasuoni. Quest'ultimo sfrutta l'azione delle onde ultrasoniche per migliorare il processo di dissoluzione dei soluti nel solvente.



Figure 6.1, 6.2, 6.3. Alcune delle soluzioni utilizzate in laboratorio.

Per valutare la possibilità di utilizzare questi polimeri nella realizzazione di filtri antiparticolato, sono state impiegate soluzioni con diverse percentuali di polimero e sono stati modificati alcuni parametri del processo di elettrofilatura. Come riportato nella tabella sottostante, inizialmente è stato mantenuto un volume totale pompato di 1 ml, una quantità relativamente bassa ma sufficiente per ottenere un filtro molto sottile. Successivamente, il volume totale pompato è stato aumentato a 10 ml e 20 ml nelle soluzioni successive.

Il sistema era collegato ad un software (WinPump) che permetteva di selezionare la velocità di pompaggio e il volume totale della soluzione da pompare.

È stato mantenuto un voltaggio di 15 kV, mentre la portata, che influisce sulla formazione e sul diametro delle fibre, è stata variata.

L'obiettivo di questa sperimentazione è quindi quello di identificare quale provino, tra quelli realizzati, e di conseguenza quale soluzione e quali parametri, siano più adatti per la formazione delle fibre.

Tabella 1. Elenco dei parametri applicati per l'elettrofilatura.

Formulazione	Campione	P%(w/w)	Flusso (ml/h)	Vol. (ml)	T (°C)	UR (%)	Volt. (kV)	Distanza (cm)
4g resina modificata-2g PLA/4g acetone	40%RM_20%PLA	60% resina modificata- PLA/acetone	1	1	24	54.7	15	15
3g resina modificata-1g PLA/ 6g acetone	30%RM_10%PLA	40% resina modificata- PLA/acetone	1	1	24	58.3	15	15
3g resina-1g PLA/6g acetone	30%R_10%PLA	40% resina- PLA/acetone	1	1	24	58.3	15	15
4g resina-6gr PLA/10g acetone	20%R_30%PLA	50% resina- PLA/acetone	1	1	22.6	51.4	15	15
4g resina modificata-6g PLA/10g acetone	20%RM_30%PLA	50% resina modificata- PLA/acetone	1	1	22.6	51.4	15	15

30g resina modificata- 10g PLA/60g acetone	30%RM_10%PLA1	40% resina modificata- PLA/acetone	4	20	23.9	49.2	15	15
30g resina modificata- 10g PLA/60g acetone	30%RM_10%PLA2	40% resina modificata- PLA/acetone	2	10	24.6	54	15	15
30g resina modificata- 10g PLA/60g acetone	30%RM_10%PLA3	40% resina modificata- PLA/acetone	2	20	24.6	54	15	15
3g resina + 1g PLA/ acetone	30%R_10%PLA	40% resina- PLA/acetone	1	1	24	58.3	15	15
7.5g resina modificata+ 0.4g PLA/ 2.1g acetone	75%RM_4%PLA	79% resina modificata- PLA/acetone	1	1	-	-	15	10
50% resina/ acetone	50%R	50% resina/ acetone	1	1	21	58	15	15
85% resina modificata/ acetone	85%RM	85% resina modificata/ace tone	1	1	24	58.3	15	15
60% resina/ acetone	60%R	60% resina/ acetone	1	1	22.6	50	15	15
10% PLA	10%PLA	10% PLA/ acetone	4	19	19.4	26	15	15

Dove:

P% (w/w): Percentuale di polimero nella soluzione (% peso su peso).

Flusso (ml/h): Velocità con cui la soluzione viene pompata attraverso la siringa.

Vol. (ml): Volume totale della soluzione pompata durante il processo.

T (°C): Temperatura ambiente misurata durante il test.

UR (%): Umidità relativa nell'ambiente misurata durante il test.

Volt. (kV): Voltaggio applicato per l'elettrofilatura.

Distanza (cm): Distanza tra l'ago e il collettore.

I valori di temperatura e umidità relativa riportati nella tabella sopra sono stati misurati ogni giorno, prima di eseguire la prova, utilizzando il misuratore di particelle Trotec BQ21, che integra anche sensori per la rilevazione di questi parametri ambientali.



Figura 7. Misuratore di particelle Trotec BQ21.

Un problema ricorrente durante la procedura è stata la formazione di filamenti di polimero sull'ago, che, se non rimossi, avrebbero compromesso la deposizione sul collettore. Pertanto, per garantire la corretta esecuzione del processo, è stato necessario interrompere l'elettrofilatura e procedere con la pulizia dell'ago.

Ogni provino, infine, è stato studiato al microscopio elettronico a scansione per capire se le fibre si fossero formate e se tali fibre avessero un diametro e una porosità adatti all'utilizzo del filtro.

2.4 Caratterizzazione morfologica con microscopio elettronico a scansione (SEM)

L'efficienza dei materiali filtranti, in particolare quelli ottenuti tramite elettrofilatura, dipende fortemente dalla loro struttura, morfologia e porosità. Il microscopio elettronico a scansione (SEM) è uno degli strumenti più utilizzati per esaminare queste caratteristiche a livello microscopico, grazie alla sua capacità di fornire immagini ad alta risoluzione della superficie e della struttura interna delle fibre.

Funzionamento del SEM:

1. Emissione di elettroni: Un filamento riscaldato emette elettroni, che costituiscono il fascio primario.
2. Accelerazione: Gli elettroni vengono accelerati da un campo elettrico verso il campione, raggiungendo una velocità elevata.
3. Focalizzazione: Un sistema di lenti elettrostatiche o magnetiche concentra il fascio di elettroni su una zona molto ridotta del campione, permettendo l'analisi dettagliata.
4. Interazione con il campione: Quando gli elettroni colpiscono il campione, provocano l'emissione di elettroni secondari, raggi X e altre radiazioni, che forniscono informazioni sulla composizione e sulla topografia del campione.
5. Raccolta dei segnali: I segnali emessi vengono raccolti da rilevatori sensibili, che possono misurare la quantità e il tipo di radiazione emessa.
6. Formazione dell'immagine: I segnali raccolti vengono convertiti in un'immagine visibile su un monitor, consentendo l'osservazione dettagliata della superficie e della morfologia delle fibre.

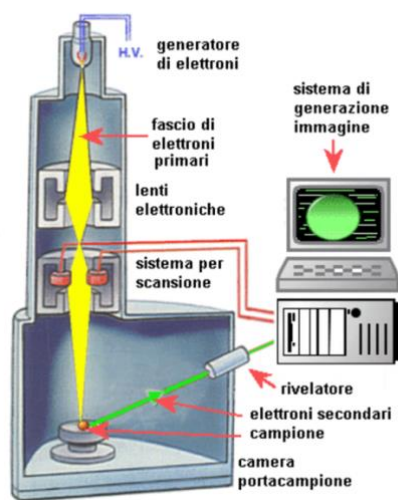


Figura 8. Schema del funzionamento di un Microscopio Elettronico a Scansione.

2.4.1 Risultati della morfologia

Di seguito si riportano le immagini fatte al microscopio di alcuni dei filtri sviluppati in laboratorio, i cui parametri sono riportati in *Tabella 1*.

Campione “30%R_10%PLA”: non si sono formate fibre.

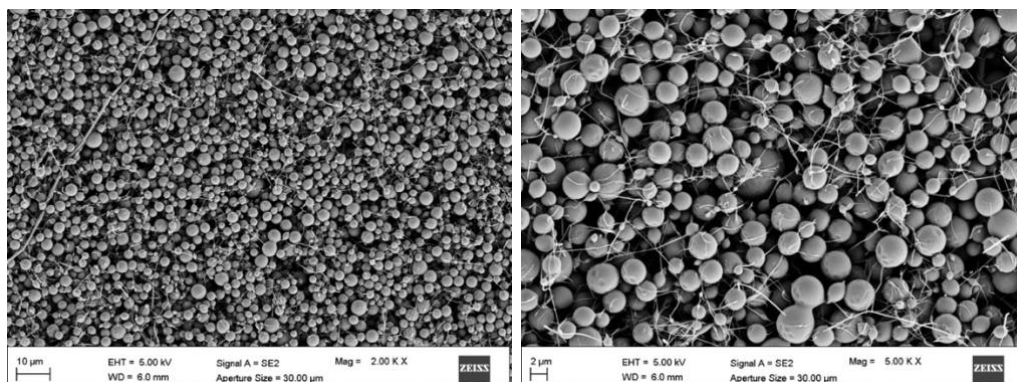


Figure 9.1, 9.2. Immagini SEM del campione "30%R_10%PLA".

Campione “75%RM_4%PLA”: caratterizzato da una buona quantità di fibre.

Da questo campione è anche possibile definire il diametro della fibra. Diametri fibre compresi tra 1.000 μm e 1.500 μm circa.

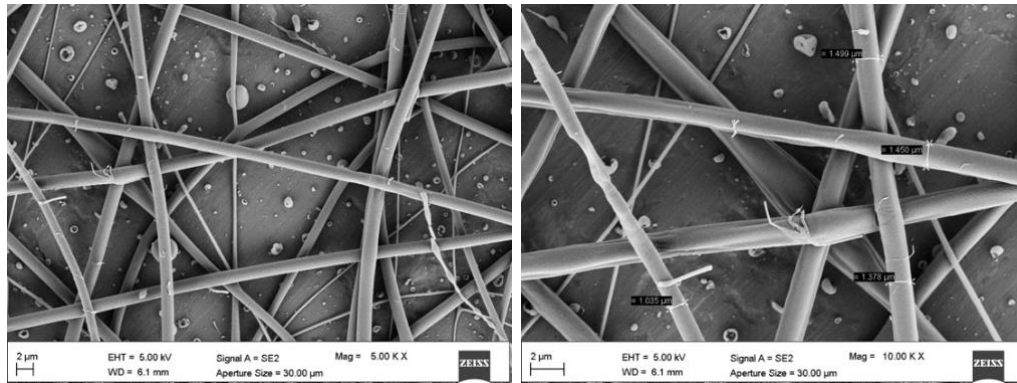
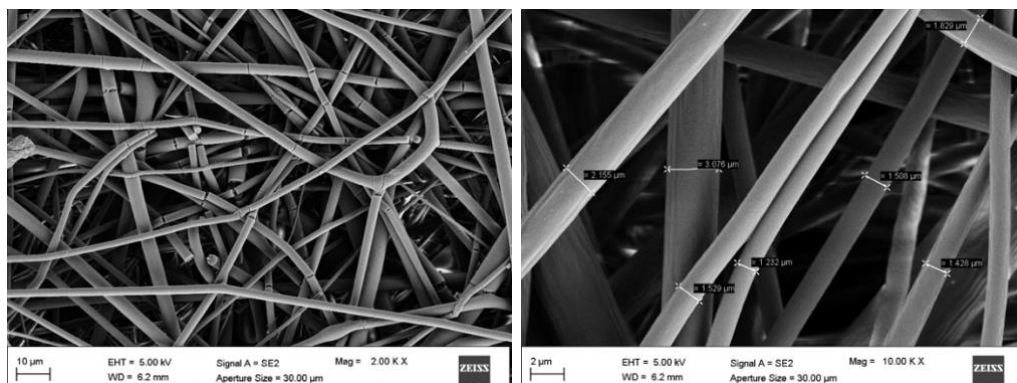


Figure 10.1, 10.2. Immagini SEM del campione "75%RM_4%PLA".

Campione “30%RM_10%PLA”: caratterizzato da una buona quantità di fibre.

Da questo campione è anche possibile definire il diametro delle fibre.



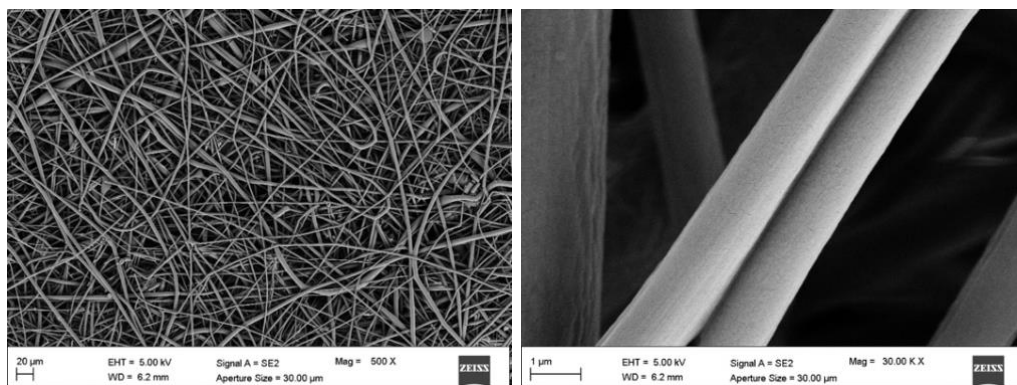


Figure 11.1, 11.2, 11.3, 11.4. Immagini SEM del campione "30%RM_10%PLA".

Campione “50%R”: non si sono formate fibre neanche parzialmente, la concentrazione di polimero è troppo bassa.

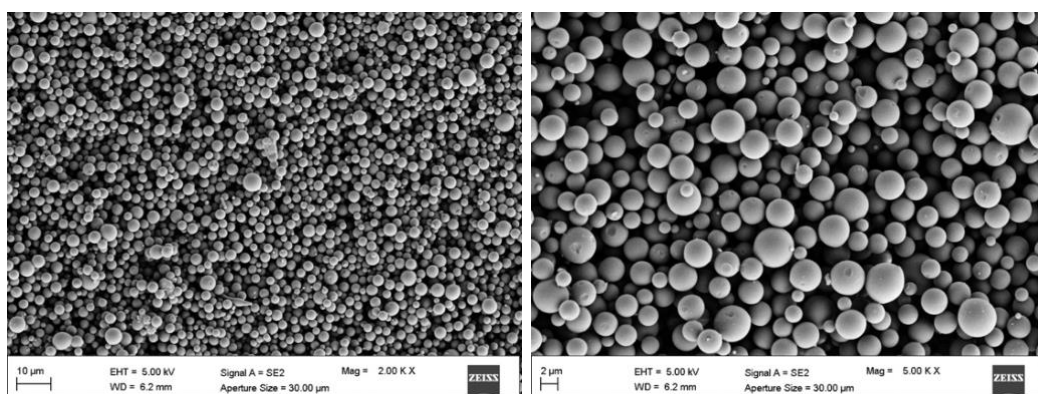


Figure 12.1, 12.2. Immagini SEM del campione "50%R".

Campione “85%RM”: Sono presenti accumuli visibili di polimero legati all’instabilità del getto della soluzione polimerica. Diverse fibre sono rotte, questo potrebbe indicare condizioni di elettrofilatura non ottimali.

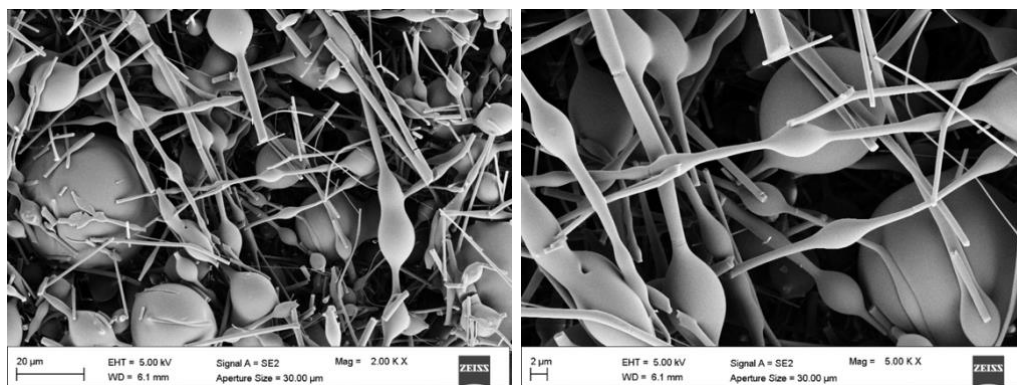


Figure 13.1, 13.2. Immagini SEM del campione "85%RM".

Campione “60%R”: non si sono formate fibre neanche parzialmente, la concentrazione di polimero è troppo bassa.

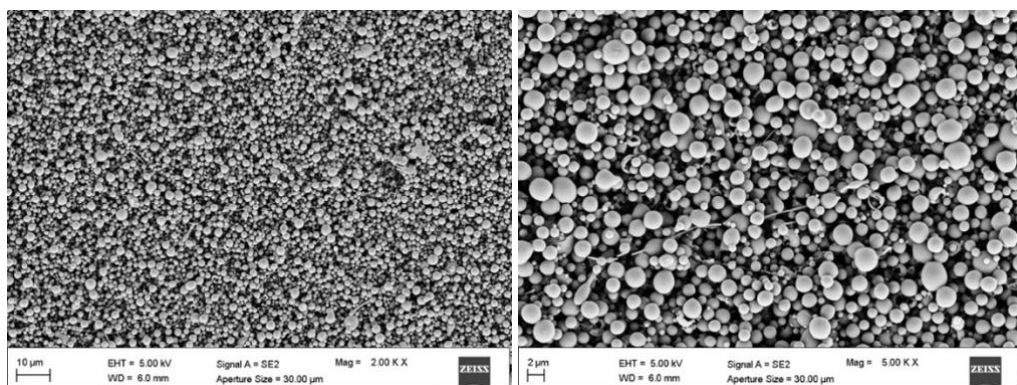


Figure 14.1, 14.2. Immagini SEM del campione "60%R".

Campione “20%R_30%PLA”: Diverse fibre sono rotte o attorcigliate e questa serie di fenomeni potrebbe indicare condizioni di elettrofilatura non ottimali.

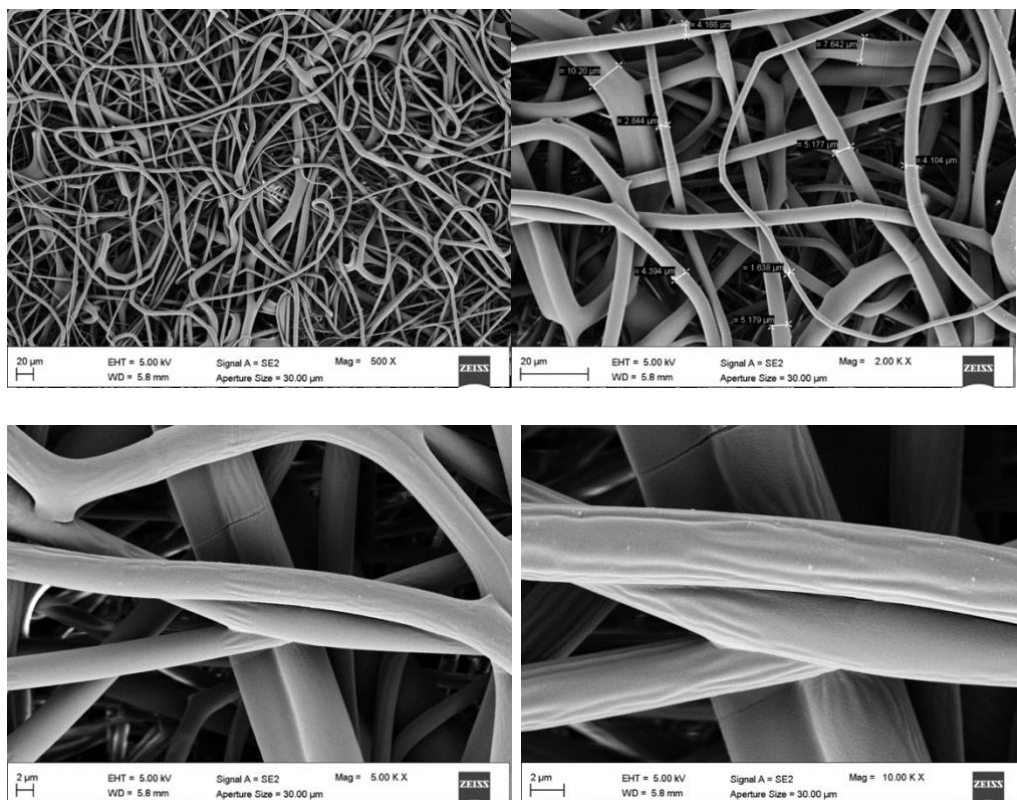


Figure 15.1, 15.2, 15.3, 15.4. Immagini SEM del campione "20%R_30%PLA".

Tabella 2. Diametri medi delle fibre dei filtri.

Campione	Diametro medio della fibra
30%R_10%PLA	Nessuna fibra
75%RM_4%PLA	1.3405 μm
30%RM_10%PLA	1.822 μm
50%R	Nessuna fibra
85%RM	Nessuna fibra
60%R	Nessuna fibra
20%R_30%PLA	5.038 μm

2.4.2 Discussione della morfologia

L'utilizzo del microscopio elettronico a scansione (SEM) è stato essenziale per caratterizzare i filtri sviluppati durante lo studio, fornendo una visione dettagliata delle loro proprietà morfologiche e strutturali. Poiché la qualità del filtro è strettamente legata alla struttura e alla distribuzione delle fibre, il SEM si è rivelato uno strumento indispensabile per identificare eventuali problematiche e confermare i risultati ottenuti durante il processo di elettrofilatura.

Dai risultati analizzati, emerge che alcuni campioni non hanno mostrato una formazione completa o uniforme delle fibre, come nel caso di “30%R_10%PLA” e “60%R”. Questa condizione potrebbe essere imputabile a una concentrazione insufficiente di polimero nella soluzione o a parametri di processo non ottimali. Altri campioni, come “85%RM”, hanno evidenziato accumuli di polimero e la presenza di fibre rotte, segno di instabilità del getto durante l'elettrofilatura. Questi fenomeni suggeriscono la necessità di un controllo più rigoroso dei parametri operativi, quali la viscosità della soluzione e la tensione applicata.

D'altro canto, alcuni campioni, come “75%RM_4PLA” e “30%RM_10PLA”, hanno mostrato una formazione soddisfacente delle fibre. Questo risultato evidenzia come una maggiore concentrazione di polimero combinata a

parametri adeguati possa favorire la creazione di strutture stabili e uniformi, migliorando le proprietà filtranti del materiale.

L'analisi SEM ha dunque evidenziato la stretta dipendenza della formazione delle fibre da un equilibrio ottimale tra la concentrazione del polimero, i parametri di elettrofilatura e le condizioni ambientali, come l'umidità. Questi risultati offrono indicazioni preziose per futuri miglioramenti, suggerendo la possibilità di testare combinazioni alternative di polimeri, ottimizzare ulteriormente i parametri di processo e integrare tecnologie che favoriscano la formazione uniforme delle fibre, come l'uso di solventi differenti o di additivi. In conclusione, il SEM ha confermato il suo ruolo fondamentale nell'identificare criticità e potenzialità nei filtri sviluppati, fornendo una solida base per il perfezionamento delle tecnologie impiegate. I dati raccolti rappresentano un valido punto di partenza per progettare filtri ancora più performanti e per sviluppare soluzioni innovative che rispondano efficacemente alle esigenze di sostenibilità e qualità della filtrazione.

2.5 Valutazione dell'efficienza di filtrazione

Per valutare l'efficienza dei filtri elettrofilati nella rimozione del particolato fine (PM), è stato utilizzato un impianto costituito da una stanza di 12 m³, dotata di due ventilatori e un umidificatore alimentato con una soluzione di NaCl al 2%

w/v. La stanza è connessa all'esterno tramite un tubo in PVC, all'interno del quale è possibile inserire il filtro tramite un supporto realizzato in PLA con diametro di 6 cm, stampato in 3D. L'aria viene aspirata dalla stanza tramite un sistema di estrazione collegato al tubo, che genera un flusso di 12 m³/h (200 l/min). L'umidificatore disperde micro-goccioline della soluzione nell'aria (aerosolizzazione); l'evaporazione dell'acqua lascia sospese nell'aria le particelle di NaCl, generando così particolato (PM). Per monitorare la concentrazione di particelle sia all'interno che all'esterno della stanza di prova, sono stati utilizzati due contatori di particelle Trotec BQ21.

Il dispositivo è dotato di due canali, progettati per misurare particelle di dimensioni rispettivamente pari a 2.5 e 10 µm, che corrispondono alle categorie internazionalmente riconosciute di particolato fine, PM_{2.5} e PM₁₀.

La prova ha inizio con l'accensione dell'umidificatore all'interno della stanza e la chiusura della porta. I due contatori di particelle Trotec BQ21 vengono posizionati uno all'interno della stanza e l'altro all'esterno del tubo in PVC, per misurare la concentrazione di PM_{2.5} e PM₁₀ sia all'interno che all'uscita del filtro. La durata della prova è di 5 minuti, ma dopo 10 secondi l'umidificatore viene spento per evitare che la concentrazione di particelle superi il limite

massimo rilevabile dallo strumento, pari a $2000 \mu\text{g}/\text{m}^3$, all'interno della camera.



Figure 16.1, 16.2, 16.3. Configurazione dell'impianto di prova e strumentazione utilizzata per il test di efficienza del filtro.

2.5.1 Risultati di efficienza filtrante

Filtro su cui abbiamo eseguito la prova: campione “10%PLA”.



Figura 17. Filtri "10%PLA (1)", "10%PLA (2)", "10%PLA (3)" testati nella prova.

Tabella 3. Misurazioni delle proprietà di filtrazione dei filtri elettrofilati.

Filtro	Caduta di pressione (Pa)	Efficienza PM2.5 (%)	Efficienza PM10 (%)
10% PLA (1)	96 (-132)	99,33	99,30
10% PLA (2)	101 (-137)	100,68	100,63
10% PLA (3)	88 (-99)	98,25	98,92

Una delle grandezze fondamentali misurate nella prova di filtrazione è la caduta di pressione, ossia la differenza di pressione misurata tra l'ingresso e l'uscita del filtro quando un fluido, come l'aria, lo attraversa. È un parametro importante per valutare la resistenza del filtro al passaggio dell'aria e la sua efficienza operativa.

Prima del test, questa grandezza è stata misurata tramite lo strumento Trotec TA400. I due tubi del manometro sono stati collegati al tubo in PVC tramite due uscite dell'aria, una prima e una dopo il filtro; in questo modo lo strumento può misurare la pressione prima e dopo il filtro e calcolare automaticamente la pressione differenziale.



Figura 18. Strumento Trotec TA400.

Mentre per il calcolo dell'efficienza di filtrazione, altra grandezza fondamentale della prova, abbiamo utilizzato la seguente formula, partendo dai dati registrati dai due misuratori di particelle posti uno all'interno e uno all'esterno della stanza:

$$efficienza(\%) = \frac{(Cf(in) - C0(in)) - (Cf(out) - C0(out))}{(Cf(in) - C0(in))}$$

Dove:

Cf(in): concentrazione PM finale all'interno della stanza.

Cf(out): concentrazione PM finale all'esterno della stanza.

C0(in): concentrazione iniziale PM all'interno della stanza.

C0(out): concentrazione iniziale PM all'esterno della stanza

2.5.2 Andamento della concentrazione di PM nel tempo

Filtro "10%PLA (1)":

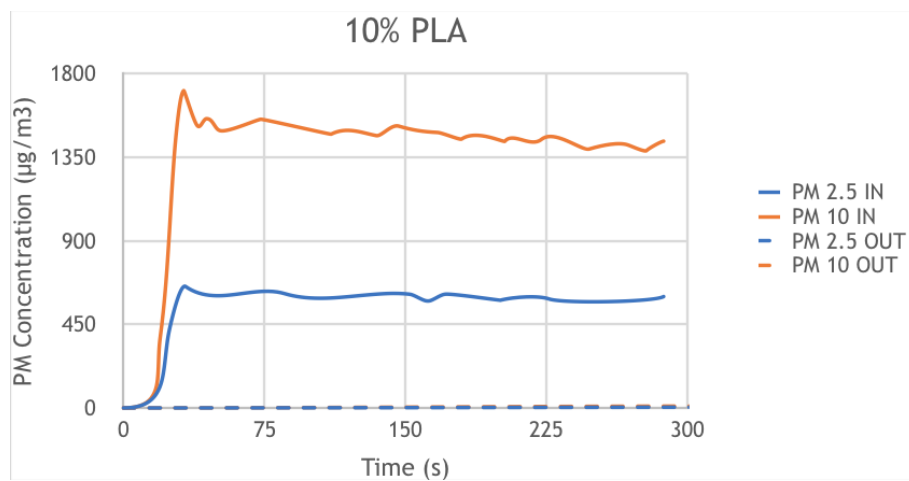


Figura 19. Andamento della concentrazione di PM nel tempo per il provino "10%PLA (1)".

Filtro “10%PLA (2)”:

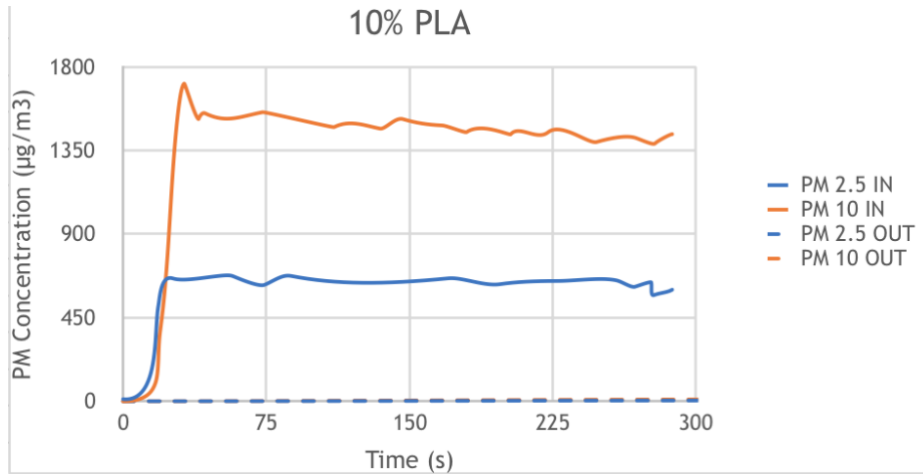


Figura 20. Andamento della concentrazione di PM nel tempo per il provino "10%PLA (2)".

Filtro “10%PLA (3)”:

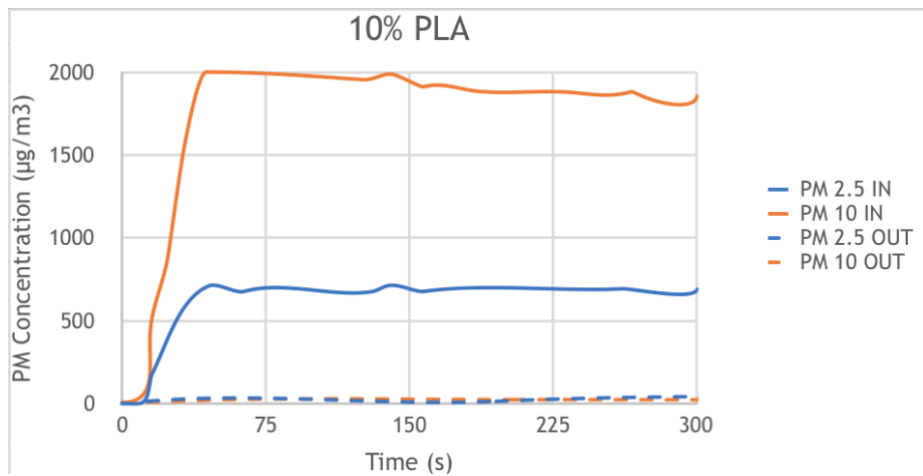


Figura 21. Andamento della concentrazione di PM nel tempo per il provino "10%PLA (3)".

In ogni grafico possiamo notare una parte iniziale con andamento crescente corrispondente all'accensione dell'umidificatore e alla dispersione della soluzione di NaCl.

Il valore di PM all'esterno della stanza è minore rispetto ai valori di PM misurati all'interno a causa della presenza del filtro.

Dopo 10 secondi, tempo corrispondente allo spegnimento dell'umidificatore, si registra un picco di concentrazione dopo del quale l'andamento rimarrà pressoché costante, con un andamento lievemente decrescente, dovuto alle particelle contenute all'interno del solo flusso di aria che attraversa il tubo.

La costanza della concentrazione di PM misurata dallo strumento posto all'esterno indica che il filtro è particolarmente efficiente.

2.5.3 Discussione dell'efficienza filtrante

La prova di filtrazione eseguita su tre campioni distinti della stessa composizione "10%PLA" ha fornito risultati consistenti, confermando un'elevata efficienza nella rimozione di particelle PM_{2.5} e PM₁₀, con valori rispettivamente superiori al 98% in tutti i test. La caduta di pressione è risultata variabile tra 88 Pa e 101 Pa, un intervallo che indica una resistenza al passaggio dell'aria contenuta e adeguata per applicazioni pratiche.

Dai grafici emerge che la concentrazione di particelle all'uscita del filtro rimane significativamente inferiore rispetto a quella all'interno della camera, dimostrando la capacità del filtro di ridurre efficacemente il particolato fine.

La stabilità della concentrazione esterna dopo lo spegnimento dell'umidificatore conferma inoltre la costanza delle prestazioni dei filtri nel tempo. I risultati ottenuti da campioni diversi della stessa composizione confermano l'affidabilità del materiale e la ripetibilità del processo di produzione. In conclusione, la prova ha evidenziato l'efficacia dei filtri "10%PLA" nel trattenere particolato fine, garantendo al contempo una caduta di pressione contenuta, e ha fornito una solida validazione sperimentale della loro qualità.

3. FOTOCATALIZZATORI

3.1 Rimozione di NO_x

Gli ossidi di azoto (NO_x) rivestono un ruolo di primaria importanza sia in ambito chimico che ambientale, con implicazioni dirette sulla qualità dell'aria e sulla salute umana. In questo contesto, il monitoraggio preciso delle loro concentrazioni è essenziale per comprendere i meccanismi di inquinamento atmosferico e valutare l'efficacia delle politiche ambientali. Per il presente studio, lo strumento scelto per la misura delle concentrazioni di NO_x è il *Nitrogen Oxides Analyzer Model 8841*, un analizzatore altamente sensibile in grado di rilevare in tempo reale le concentrazioni di monossido di azoto (NO) e biossido di azoto (NO₂). Questo strumento sarà utilizzato in combinazione con il *Permeation and Dilution System Calibrator 8188*, un dispositivo che permette il pompaggio controllato dell'azoto nelle varie zone di interesse, garantendo la calibrazione e la diluizione adeguata dei campioni per misurazioni precise e affidabili. Il presente paragrafo si concentrerà sull'utilizzo di questi strumenti nel monitoraggio degli ossidi di azoto, approfondendo le modalità di misurazione, le tecniche di calibrazione e la gestione dei dati sperimentali per un'analisi accurata delle concentrazioni di NO_x in ambienti controllati.

3.1.1 Strumentazione e Metodologia di Analisi dei NO_x



Figura 22. Strumentazione per l'analisi dei NO_x.

Il *Nitrogen Oxides Analyzer Model 8841* è uno strumento che misura con alta precisione le concentrazioni di monossido di azoto (NO) e biossido di azoto (NO₂) nei campioni gassosi, utilizzando una tecnologia di rilevazione chemiluminescente. In pratica, il campione gassoso viene miscelato con ozono (O₃), generando una reazione chimica che produce luce visibile. La quantità di luce emessa è direttamente proporzionale alla concentrazione di NO, che viene misurato tramite un fotomoltiplicatore. Per determinare la concentrazione di NO₂, il campione viene trattato in una camera di riduzione catalitica, dove il NO₂ viene trasformato in NO, permettendo di calcolare la concentrazione di NO₂ tramite la differenza con il NO totale. Questo strumento offre alta

sensibilità, un rapido tempo di risposta e una vasta gamma di applicazioni, tra cui il monitoraggio ambientale e il controllo delle emissioni industriali.

Il *Permeation and Dilution System Calibrator 8188* è utilizzato per calibrare e diluire i gas in ingresso, generando concentrazioni precise e controllate di NO_x.

Funziona grazie alla permeazione di gas attraverso una membrana semipermeabile, che rilascia lentamente un gas target (come il NO) quando riscaldato. Il gas prodotto viene diluito con azoto e regolato con precisione per ottenere la concentrazione desiderata, che viene poi inviata all'analizzatore per la calibrazione. Questo strumento garantisce un controllo accurato delle concentrazioni di calibrazione, fondamentale per assicurare misurazioni precise.

In combinazione, questi due strumenti consentono una calibrazione accurata e misurazioni affidabili delle concentrazioni di NO_x in esperimenti di laboratorio.

L'analizzatore 8841 fornisce letture precise grazie alla calibrazione effettuata con il calibratore 8188, garantendo la validità e l'affidabilità dei dati ottenuti.

3.1.2 Procedura sperimentale

È stata testata la funzionalità di diversi minerali fotocatalitici nell'adsorbire inquinanti aerodispersi in ambienti chiusi, in presenza di luce a lunghezza

d'onda del visibile (VIS) o ultravioletta (UV), e, per un campione specifico, anche in presenza di una lampada solare.

Per l'analisi dei campioni, iniziamo pesando con una bilancia analitica circa 20 mg di ciascun campione: NiQ, H₂Q e MnQ. Successivamente, ogni campione viene trasferito in un becker, dove viene diluito con acqua deionizzata. Per favorire l'omogeneizzazione del campione, questo viene sottoposto a trattamento con un bagno ad ultrasuoni per 10 minuti a temperatura ambiente (20°C). Il becker viene quindi sigillato con del parafilm per evitare perdite di soluzione.



Figura 23. Campioni sottoposti a trattamento con bagni ad ultrasuoni.

Il passo successivo consiste nella pesatura di un vetrino porta campione, precedentemente igienizzato, che viene registrato come P_v , dove P_v rappresenta il peso del vetrino vuoto. Successivamente, il contenuto

del becker viene versato gradualmente sopra il vetrino, che viene poi posizionato sotto una lampada a infrarossi (IR) a una distanza di 10-15 cm. La lampada viene accesa per consentire l'evaporazione dell'acqua contenuta nella soluzione, riscaldando la superficie fino a raggiungere i 108°C.

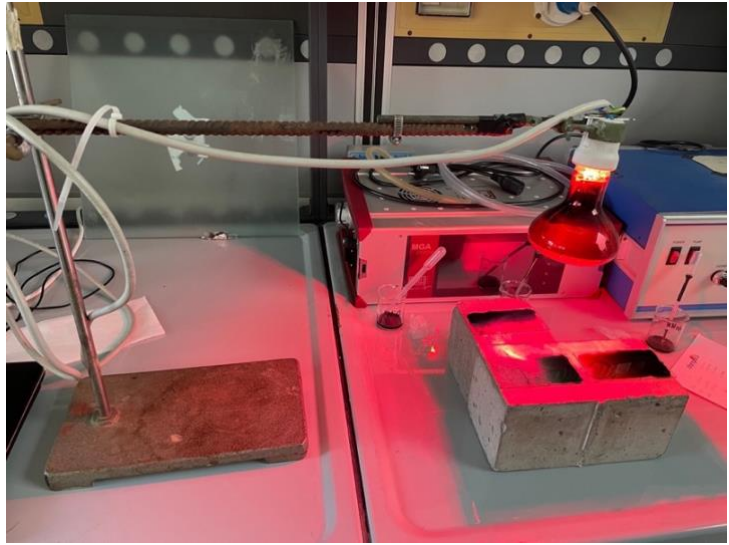
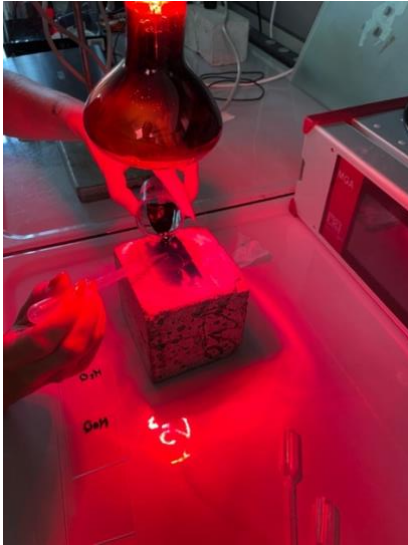


Figure 24.1, 24.2. Lampada a infrarossi utilizzata in laboratorio.

Il peso del vetrino con il campione viene registrato come P_{vc} (peso del vetrino più campione). Per garantire una completa disidratazione del campione, viene quindi utilizzato un essiccatore (forno a 70°C) per un periodo di circa 12 ore. Dopo questo trattamento, il peso effettivo del campione nel vetrino viene ricalcolato, poiché durante il processo di preparazione potrebbero verificarsi delle perdite di peso. Il peso effettivo del campione viene determinato dalla differenza tra P_{vc} e P_v , cioè $P_{c2} = P_{vc} - P_v$, dove P_{c2} rappresenta il peso finale del campione essiccato nel vetrino.



Figura 25. Provini pronti per l'analisi dopo il trattamento di essiccazione.

Tabella 4. Misurazioni dei pesi dei campioni e del vetrino e differenze finali.

Campione	Peso Pc (g)	Peso vetrino Pv (g)	Totale Pvc (g)	Differenza Pc2 (g)
NiQ	0,02057	14,81248	14,83011	0,01763
H2Q	0,0202	14,76255	14,78571	0,02194
MnQ	0,02016	15,85873	15,87985	0,02112

Dove:

Pc: peso del campione (circa 20 mg).

Pv: peso del vetrino.

Pvc: peso vetrino + campione essiccato.

Pc2: peso campione dopo processo di preparazione.

Prima dell'inizio delle misurazioni, è necessario regolare la concentrazione di NO e NO_x a 0,5 ppm e la pressione a 0,05 bar, utilizzando la valvola della bombola di azoto. Il flusso di NO_x viene mantenuto a 0,7 Ncc./min.

Il campione viene inserito in un portacampione bipartito, dotato di un cuscinetto situato nel lembo inferiore, che garantisce un migliore isolamento dell'ambiente interno durante la sigillatura. Il dispositivo è composto da strati sovrapposti di polimetilmetacrilato (PMMA), ciascuno dello spessore di 1,5 mm, incollati insieme. Le pareti laterali del box interno sono realizzate in PMMA, mentre la faccia superiore e inferiore sono in vetro borosilicato (spessore 1,5 mm). Le dimensioni del box sono 11,5 cm x 5,5 cm x 2 cm, con un volume totale di 126,5 cm³. Il box è collegato al sistema mediante due tubazioni che permettono un ricircolo continuo dell'inquinante, il quale viene trasportato all'analizzatore per l'analisi.

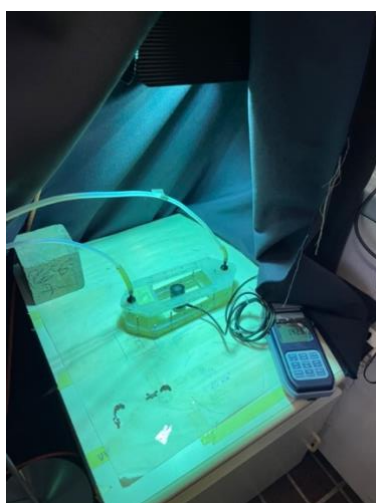


Figura 26. Portacampione.

Prima dell'inizio della prova, è essenziale misurare la radianza delle luci artificiali utilizzate per avviare il processo di fotocatalisi. Le misurazioni della radianza sono le seguenti: per la luce visibile, la radianza è pari a 20 W/m²,

mentre per la luce UV è pari a 18 W/m^2 , ottenuta posizionando la fonte luminosa a una distanza di 8 cm dal campione. Inoltre, per il campione testato con la lampada solare, la radianza UV è pari a 108 W/m^2 e la radianza visibile è di 915 W/m^2 .

I dati raccolti durante le misurazioni vengono inseriti in una tabella Excel per successiva elaborazione. In particolare, vengono costruiti grafici a dispersione in cui l'ordinata rappresenta la concentrazione in ppm e l'ascissa il tempo in minuti. I valori di concentrazione, misurati a intervalli di 5 minuti, vengono registrati dal monitor dello strumento, fornendo le letture per NO_x e NO. La concentrazione di NO_2 viene calcolata per differenza.

La procedura per valutare l'efficienza dei campioni durante l'esperimento si articola nei seguenti passaggi:

1. Analisi preliminare con il box vuoto per un tempo sufficiente a stabilizzare la concentrazione interna, che dovrebbe stabilizzarsi intorno a 0,5 ppm sia per NO_x che per NO.
2. Inserimento del campione nel portacampione e attesa che la concentrazione si ristabilisca (circa 15 minuti).

3. Accensione della lampada visibile e registrazione dei dati nel file Excel, mantenendo la lampada accesa fino a stabilizzazione delle concentrazioni (circa 15 minuti).
4. Accensione della lampada UV e registrazione dei dati nel file Excel, continuando l'illuminazione fino al raggiungimento di una concentrazione stabile (circa 15 minuti).
5. Per il campione H₂Q, successivamente viene introdotta una lampada solare, seguendo la stessa procedura descritta nei punti 3 e 4.
6. Al termine, spegnimento delle luci e attesa della stabilizzazione delle concentrazioni.

3.1.3 Risultati test di fotocatalisi

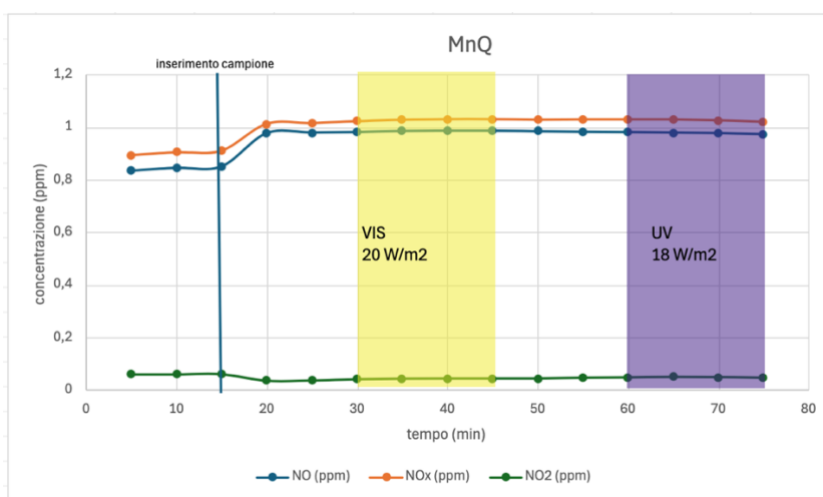


Figura 27. Grafico dell'andamento di NO_x, NO e di generazione di NO₂ ottenuti dall'irradiazione della luce VIS e UV sul campione MnQ

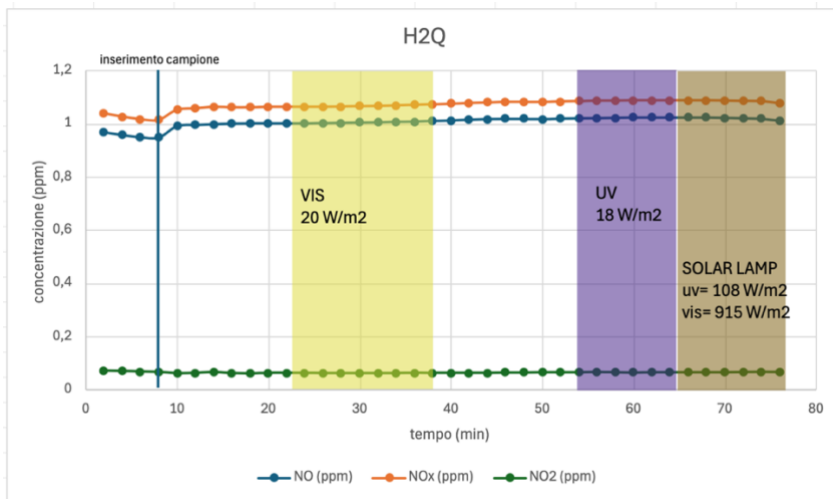


Figura 28. Grafico dell'andamento di NO_x , NO e di generazione di NO_2 ottenuti dall'irradiazione della luce VIS, UV e Solar Lamp sul campione H2Q.

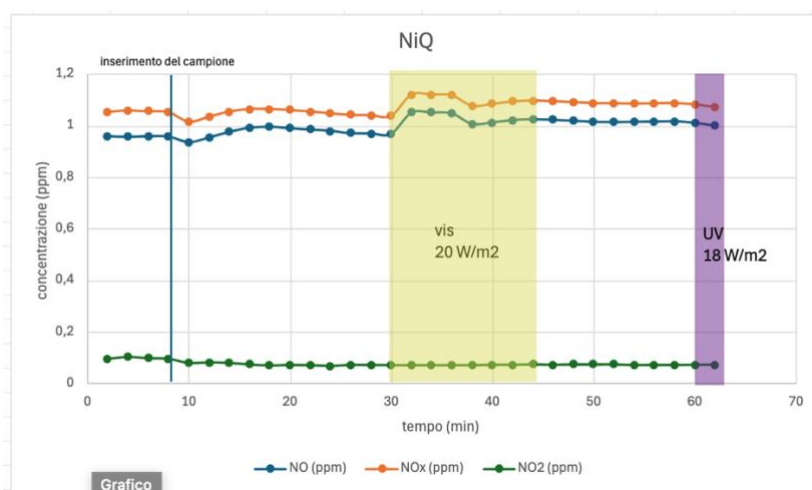


Figura 29. Grafico dell'andamento di NO_x , NO e di generazione di NO_2 ottenuti dall'irradiazione della luce VIS e UV sul campione NiQ.

Notiamo dai grafici che né la presenza di luce VIS, né la presenza di luce UV, né l'introduzione della lampada solare influenzano in alcun modo le concentrazioni degli inquinanti, mantenendole inalterate. Possiamo notare che

nel grafico di NiQ la luce VIS provoca un innalzamento lieve nei primi 10 minuti circa, per poi stabilizzarsi.

Ne consegue che l'efficienza di rimozione di NO dei provini testati, alle condizioni date, risulta inesistente.

3.1.4 Discussione finale proprietà fotocatalitiche

La parte sperimentale relativa agli ossidi di azoto ha evidenziato risultati di particolare interesse, pur sottolineando alcune limitazioni nei materiali testati.

Dai grafici analizzati emerge che né la luce visibile né quella UV hanno influenzato significativamente le concentrazioni di NO_x nei campioni analizzati. La stabilità delle concentrazioni registrate durante l'intera prova indica che i materiali testati non hanno mostrato capacità rilevanti di adsorbimento o conversione degli ossidi di azoto in condizioni di irradiazione luminosa. Un lieve incremento iniziale osservato per il campione NiQ sotto luce VIS, seguito da una stabilizzazione, suggerisce che tale fenomeno possa essere attribuito a fluttuazioni del sistema più che a una reale interazione chimico-fisica con il materiale.

Nel complesso, l'efficienza di rimozione degli ossidi di azoto si è dimostrata trascurabile per tutti i campioni testati, indicando che le condizioni sperimentali adottate o i materiali selezionati non erano sufficientemente ottimali per

ottenere risultati significativi. Questo esito evidenzia l'esigenza di ulteriori approfondimenti, come l'esplorazione di materiali fotocatalitici con maggiore sensibilità alla luce o la modifica dei parametri di prova, quali la radianza o la concentrazione iniziale degli inquinanti.

In sintesi, i risultati sperimentali hanno fornito un quadro chiaro sulle prestazioni limitate dei materiali testati nel contesto dell'adsorbimento o della degradazione degli ossidi di azoto, sottolineando la necessità di sviluppare approcci più avanzati per affrontare questa specifica problematica ambientale.

3.2 Rimozione di COV

Questo paragrafo si focalizza sull'analisi dell'interazione tra il composto organico volatile (COV) metiletilchetone (MEK) e diversi campioni sperimentali, utilizzando un PID (rilevatore di fotoionizzazione). L'esperimento è stato condotto in un box di circa 17 L, in cui il MEK è stato iniettato e lasciato reagire con i campioni sotto luce visibile (VIS) e UV. L'obiettivo principale è stato valutare la capacità di adsorbimento (condizione di oscurità) e fotodegradazione (sotto VIS o UV) dei campioni, raccogliendo dati che saranno discussi nelle sezioni successive. I campioni utilizzati sono stati preparati seguendo la stessa metodologia descritta nel paragrafo 3.1.2 per l'analisi degli NO_x.

3.2.1 Caratteristiche del setup sperimentale

Per ogni prova, il campione selezionato è stato posizionato all'interno del box e 1 μL di MEK è stato iniettato utilizzando una siringa, garantendo una concentrazione iniziale uniforme. Il MEK è un COV caratterizzato da alta volatilità e reattività chimica. Nel contesto sperimentale, è stato scelto come inquinante modello per valutare l'efficacia di adsorbimento e fotocatalisi dei campioni testati.

Sono state eseguite tre prove distinte per confrontare l'adsorbimento sotto diverse condizioni di illuminazione.

Per valutare l'effetto della sigillatura imperfetta del box, è stato condotto un test in bianco (blank test). In questa prova, la scatola è stata sigillata senza campioni reattivi e l'andamento della concentrazione di MEK è stato monitorato. Questo test ha fornito un riferimento per distinguere le perdite di MEK dovute al setup dalle variazioni attribuibili ai campioni.



Figura 30. Setup della prova.

3.2.2 Risultati e Discussione

Prima prova: i campioni testati mostrano una lieve riduzione iniziale della concentrazione di MEK, indicando capacità di adsorbimento variabile tra i diversi materiali. H₂Q emerge come uno dei campioni più promettenti.

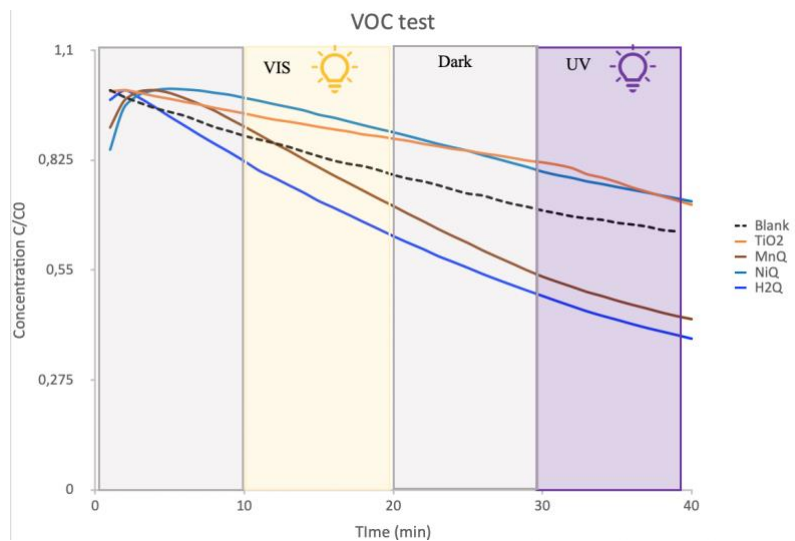


Figura 31. Andamento della concentrazione di MEK nella prima prova di test.

Seconda prova: la curva di concentrazione del MEK per campioni come TiO_2 e NiQ risulta sensibilmente più bassa, suggerendo proprietà specifiche di interazione con il MEK. Il TiO_2 è in grado di degradare il MEK sotto luce UV.

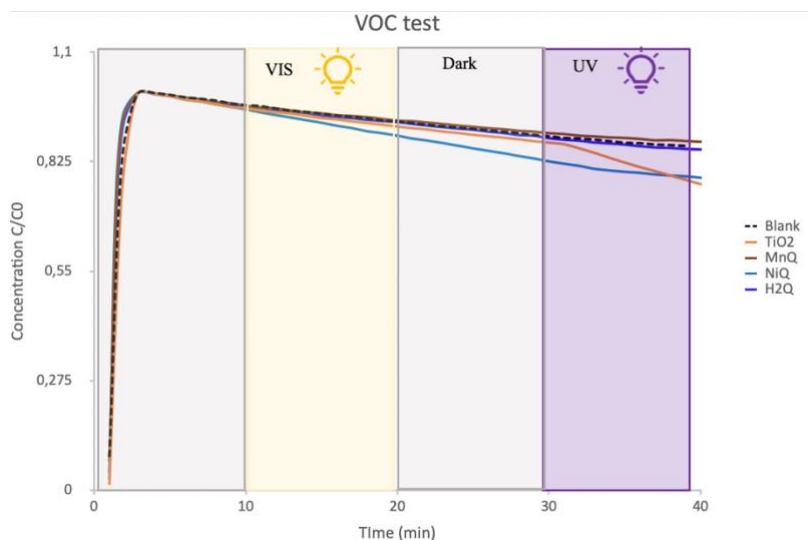


Figura 32. Andamento della concentrazione di MEK nella seconda prova di test.

Terza prova: sotto luce UV, i campioni con potenziali proprietà fotocatalitiche, come TiO_2 , mostrano una riduzione marcata del MEK, confermando la loro attivazione sotto UV.

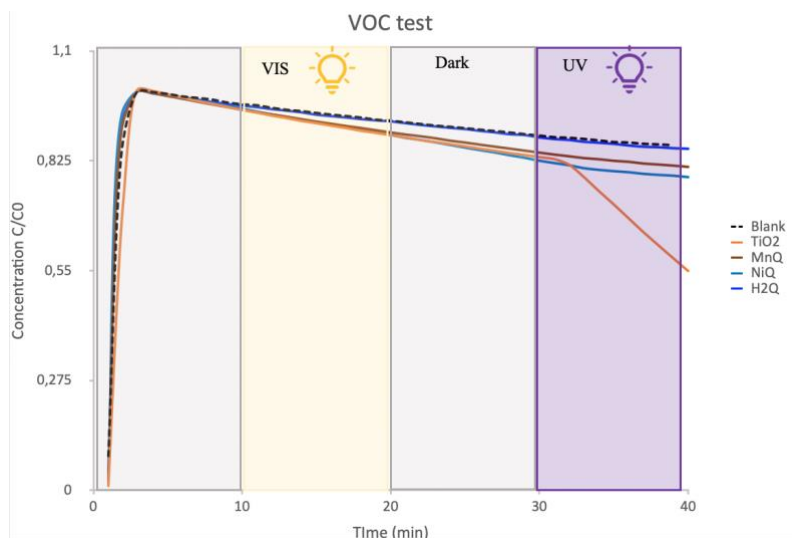


Figura 33. Andamento della concentrazione di MEK nella terza prova di test.

3.2.3 Considerazioni finali

L'esperimento ha evidenziato alcune criticità metodologiche, in particolare legate alla mancanza di sigillatura ottimale del box, che ha introdotto variabilità nei risultati e compromesso la riproducibilità delle misurazioni. Il test in bianco ha confermato che una parte significativa della perdita di MEK è attribuibile a questa imperfezione strutturale, sottolineando l'importanza di una sigillatura adeguata a garantire dati più affidabili.

Nonostante queste limitazioni, alcuni campioni hanno dimostrato capacità di adsorbimento e attività fotocatalitica, suggerendo potenziali applicazioni per l'abbattimento dei COV. Per migliorare la qualità dei risultati futuri, è essenziale ottimizzare le condizioni operative, con particolare attenzione alla sigillatura del box e al controllo delle variabili sperimentali. Queste miglorie

permetterebbero di ottenere dati più precisi e riproducibili, supportando ulteriori studi sull'efficacia dei materiali testati per l'adsorbimento dei COV.

4. CONCLUSIONI

Lo studio condotto ha fornito una visione articolata e approfondita delle sfide e delle opportunità legate al miglioramento della qualità dell'aria interna mediante tecnologie innovative e sostenibili. Sebbene molti risultati siano stati incoraggianti, il percorso ha messo in evidenza anche alcune criticità che aprono nuove prospettive di ricerca.

I risultati sperimentali hanno dimostrato l'elevata efficacia dei filtri elettrofilati nella rimozione del particolato fine, con efficienze superiori al 98%. L'impiego di biopolimeri come il PLA e la colofonia ha permesso di ottenere prestazioni filtranti elevate, combinando l'efficacia con la sostenibilità ambientale grazie alla biodegradabilità dei materiali utilizzati. Tuttavia, la produzione dei filtri ha mostrato alcune criticità legate alla stabilità del processo di elettrofilatura, evidenziando la necessità di un maggiore controllo sui parametri operativi per garantire una qualità costante delle fibre. Ottimizzare la viscosità delle soluzioni polimeriche e affinare le condizioni di deposizione potrebbe migliorare ulteriormente le prestazioni dei filtri e renderne più affidabile la produzione su larga scala.

Per quanto riguarda la gestione degli inquinanti gassosi, l'analisi condotta sui materiali fotocatalitici non ha evidenziato variazioni significative nelle concentrazioni di ossidi di azoto (NO_x) durante le prove di attività

fotocatalitica. Questo risultato suggerisce che i materiali testati, nelle condizioni operative adottate, non siano stati in grado di attivare processi chimici efficaci per la trasformazione o la rimozione di questi inquinanti. L'assenza di effetti rilevanti può essere attribuita sia alle caratteristiche intrinseche dei materiali sia alla configurazione sperimentale, come l'intensità e il tipo di luce utilizzata, che potrebbe non essere stato sufficiente a stimolare adeguatamente l'attività fotocatalitica.

Anche nel caso dei composti organici volatili, i test hanno evidenziato alcune difficoltà metodologiche legate alla sigillatura del setup sperimentale. Questo aspetto richiama l'attenzione su come migliorare le apparecchiature, ad esempio utilizzando materiali più performanti per la chiusura delle camere o progettando box modulari che permettano un monitoraggio costante della concentrazione interna senza rischi di dispersione. Una maggiore precisione in questa fase non solo renderebbe più affidabili i risultati, ma permetterebbe di identificare con maggiore accuratezza i materiali più promettenti per l'adsorbimento dei COV.

Nel complesso, la presente tesi ha messo in luce sia le potenzialità che le criticità legate all'impiego di tecnologie innovative per il miglioramento della qualità dell'aria interna. Sebbene alcuni risultati abbiano confermato l'efficacia di specifiche soluzioni filtranti, altri aspetti richiedono ulteriori

approfondimenti per superare le limitazioni riscontrate. Il perfezionamento delle tecniche sperimentali e l'ottimizzazione dei materiali utilizzati potrebbero rappresentare le chiavi per rendere queste soluzioni più affidabili e applicabili su scala più ampia.

L'innovazione nel campo della qualità dell'aria indoor dovrà necessariamente coniugare sostenibilità, efficienza e facilità di implementazione, affinché le soluzioni sviluppate possano avere un impatto concreto nella riduzione dell'inquinamento degli ambienti confinati. Ogni criticità evidenziata nel corso della ricerca offre un'occasione per perfezionare le tecnologie, rendendole sempre più accessibili e performanti, a beneficio della salute umana e dell'ambiente.

BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

- Accordo del 27/09/2001 tra Ministero della Salute, Regioni e Province Autonome. *Sindrome dell'edificio malato: problemi e soluzioni*.
- Chenxin Lyu, Peng Zhao, Jun Xie, Shuyuan Dong, Jiawei Liu, Chengchen Rao, Jianzhong Fu (2021). *Electrospinning of Nanofibrous Membrane and Its Applications in Air Filtration: A Review*.
- Direttiva 2008/50/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 21 maggio 2008. *Qualità dell'aria ambiente e per un'aria più pulita in Europa*.
- Direttiva 2010/31/UE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 19 maggio 2010. *Prestazione energetica nell'edilizia*.
- Direttiva 2018/844/UE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 30 maggio 2018. *Modifica della Direttiva 2010/31/UE sulla prestazione energetica nell'edilizia*.
- Istituto Superiore di Sanità (ISS) (2020). *Rapporto ISS sulla qualità dell'aria indoor in Italia*.
- Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA) (2010). *Inquinamento indoor: aspetti generali e casi studio in Italia*.
- Miani, A. (2023). *Impatto dell'inquinamento atmosferico sulla salute umana*. Società Italiana di Medicina Ambientale (SIMA).
- Organizzazione Mondiale della Sanità (OMS) (2020). *Dati sull'inquinamento atmosferico domestico e salute pubblica*.
- Società Italiana di Medicina Ambientale (SIMA) (2023). *Impatto dell'inquinamento atmosferico sulla salute umana*.
- World Health Organization (WHO) (2020). *Household Air Pollution and Health*.
- <https://www.salute.gov.it>
- <https://www.who.int>
- <https://www.lung.org/clean-air/indoor-air/indoor-air-pollutants>
- <https://www.arpa.veneto.it>
- <https://www.illbruck.com/it-it/consulenza/blog/cosa-sono-i-composti-organici-volatili-cov-perche-e-come-evitarli>
- <https://biblus.acca.it/aria-indoor-ambienti-interni-qualita-e-indicatori/>
- <https://fonteufficiale.it/ambiente/cose-il-pm10>
- <https://www.wikiwand.com/it/articles/Elettrofilatura>

Indice delle tabelle

TABELLA 1. ELENCO DEI PARAMETRI APPLICATI PER L'ELETTROFILATURA.....	19
TABELLA 2. DIAMETRI MEDI DELLE FIBRE DEI FILTRI.	28
TABELLA 3. MISURAZIONI DELLE PROPRIETÀ DI FILTRAZIONE DEI FILTRI ELETTROFILATI.	33
TABELLA 4. MISURAZIONI DEI PESI DEI CAMPIONI E DEL VETRINO E DIFFERENZE FINALI.	44

Indice delle figure

FIGURA 1. MORTI GLOBALI PER INQUINAMENTO ATMOSFERICO. 5	
FIGURA 2. FONTI DI INQUINAMENTO INDOOR.	7
FIGURA 3. PROCESSO SCHEMATICO DELL'ELECTROSPINNING.....	13
FIGURA 4. MATERIALI UTILIZZATI IN LABORATORIO.....	16
FIGURA 5. AGITATORE MAGNETICO.	17
FIGURE 6.1, 6.2, 6.3. ALCUNE DELLE SOLUZIONI UTILIZZATE IN LABORATORIO.....	18
FIGURA 7. MISURATORE DI PARTICELLE TROTEC BQ21.	21
FIGURA 8. SCHEMA DEL FUNZIONAMENTO DI UN MICROSCOPIO ELETTRONICO A SCANSIONE.....	24
FIGURE 9.1, 9.2. IMMAGINI SEM DEL CAMPIONE "30%R_10%PLA".	24
FIGURE 10.1, 10.2. IMMAGINI SEM DEL CAMPIONE "75%RM_4%PLA".....	25
FIGURE 11.1, 11.2, 11.3, 11.4. IMMAGINI SEM DEL CAMPIONE "30%RM_10%PLA".....	26
FIGURE 12.1, 12.2. IMMAGINI SEM DEL CAMPIONE "50%R".	26
FIGURE 13.1, 13.2. IMMAGINI SEM DEL CAMPIONE "85%RM".	27
FIGURE 14.1, 14.2. IMMAGINI SEM DEL CAMPIONE "60%R".	27
FIGURE 15.1, 15.2, 15.3, 15.4. IMMAGINI SEM DEL CAMPIONE "20%R_30%PLA".	28
FIGURE 16.1, 16.2, 16.3. CONFIGURAZIONE DELL'IMPIANTO DI PROVA E STRUMENTAZIONE UTILIZZATA PER IL TEST DI EFFICIENZA DEL FILTRO.....	32
FIGURA 17. FILTRI "10%PLA (1)", "10%PLA (2)", "10%PLA (3)" TESTATI NELLA PROVA.....	33

FIGURA 18. STRUMENTO TROTEC TA400.	34
FIGURA 19. ANDAMENTO DELLA CONCENTRAZIONE DI PM NEL TEMPO PER IL PROVINO "10%PLA (1)".	35
FIGURA 20. ANDAMENTO DELLA CONCENTRAZIONE DI PM NEL TEMPO PER IL PROVINO "10%PLA (2)".	36
FIGURA 21. ANDAMENTO DELLA CONCENTRAZIONE DI PM NEL TEMPO PER IL PROVINO "10%PLA (3)".	36
FIGURA 22. STRUMENTAZIONE PER L'ANALISI DEI NO _x	40
FIGURA 23. CAMPIONI SOTTOPOSTI A TRATTAMENTO CON BAGNI AD ULTRASUONI.	42
FIGURE 24.1, 24.2. LAMPADA A INFRAROSSI UTILIZZATA IN LABORATORIO.	43
FIGURA 25. PROVINI PRONTI PER L'ANALISI DOPO IL TRATTAMENTO DI ESSICAZIONE.	44
FIGURA 26. PORTACAMPIONE.	45
FIGURA 27. GRAFICO DELL'ANDAMENTO DI NO _x , NO E DI GENERAZIONE DI NO ₂ OTTENUTI DALL'IRRADIAZIONE DELLA LUCE VIS E UV SUL CAMPIONE MNQ.....	47
FIGURA 28. GRAFICO DELL'ANDAMENTO DI NO _x , NO E DI GENERAZIONE DI NO ₂ OTTENUTI DALL'IRRADIAZIONE DELLA LUCE VIS, UV E SOLAR LAMP SUL CAMPIONE H2Q.....	48
FIGURA 29. GRAFICO DELL'ANDAMENTO DI NO _x , NO E DI GENERAZIONE DI NO ₂ OTTENUTI DALL'IRRADIAZIONE DELLA LUCE VIS E UV SUL CAMPIONE NIQ.....	48
FIGURA 30. SETUP DELLA PROVA.	52
FIGURA 31. ANDAMENTO DELLA CONCENTRAZIONE DI MEK NELLA PRIMA PROVA DI TEST.	52
FIGURA 32. ANDAMENTO DELLA CONCENTRAZIONE DI MEK NELLA SECONDA PROVA DI TEST.	53
FIGURA 33. ANDAMENTO DELLA CONCENTRAZIONE DI MEK NELLA TERZA PROVA DI TEST.	54