



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

**DIPARTIMENTO SCIENZE DELLA VITA E
DELL'AMBIENTE**

**Corso di Laurea Magistrale
Rischio Ambientale e Protezione Civile**

**Progettazione, realizzazione e testing di filtri elettrofilati per particolato
aerodisperso**

**Design, fabrication and testing of electrospun filters for airborne
particulate matter**

Tesi di Laurea Magistrale di:
Valentina Possanzini

Relatrice:
Maria Letizia Ruello

Correlatrice:
Natalia Czerwinska

Sessione Autunnale Ottobre 2023

Anno Accademico 2022/2023

Indice dei contenuti

Introduzione	1
Parte teorica	2
1.Particolato atmosferico	2
1.1 <i>Interazione particolato – corpo umano ed effetti sulla salute</i>	3
1.2 <i>Ambiente esterno (outdoor)</i>	4
1.3 <i>Ambiente interno (indoor)</i>	5
1.4 <i>Meccanismi filtro-particolato</i>	6
1.5 <i>Legislazione</i>	7
2.Electrospinning	9
3.Osservazione filtri	12
Parte sperimentale	14
4.Electrospinning	14
4.1 <i>Strumenti, materiali, procedura di elettrofilatura e procedure di prova</i>	14
4.2 <i>Strumenti:</i>	14
4.3 <i>Materiali:</i>	15
4.4 <i>Procedure di elettrofilatura:</i>	16
4.5.1 <i>Testing filtri:</i>	20
4.5.2 <i>Strumenti e materiali:</i>	20
4.5.3 <i>Procedure di prova test filtri:</i>	22
4.5.4 <i>Elaborazioni:</i>	23
4.5.5 <i>Risultati:</i>	24
4.6 <i>Osservazione SEM:</i>	26
4.7 <i>Distribuzione diametro fibre:</i>	28
4.8 <i>Discussione risultati:</i>	29
5.Filtri UK	32
5.1 <i>Strumenti, materiali e procedura di prova</i>	32
5.2 <i>Strumenti:</i>	32
5.3 <i>Materiali:</i>	32
5.4 <i>Procedure di prova:</i>	33
5.5 <i>Elaborazioni:</i>	33
5.6 <i>Risultati:</i>	35
5.7 <i>Osservazione SEM:</i>	38
5.8 <i>Distribuzione diametro fibre:</i>	39
5.9 <i>Discussione risultati:</i>	40
6.Considerazioni finali:	44

Bibliografia:	45
Bibliografia immagini:	47
Bibliografia tabelle:	48

Introduzione

Negli ultimi anni si è spesso sentito parlare di particolato, soprattutto nel momento in cui le sue concentrazioni hanno superato i limiti consentiti per legge, richiedendo perciò l'adozione di una serie di misure cautelative.

Il particolato è un inquinante aerodisperso che, come vedremo, rappresenta un problema considerevole sia per l'ambiente che per il corpo umano date le sue caratteristiche intrinseche e in alcuni casi l'associazione con altri inquinanti di vario genere. Alla luce di questo diventa imperativo agire alla radice del problema riducendo il più possibile l'originarsi di particolato, soprattutto antropogenico, ma anche identificare dei sistemi che ci proteggano.

È proprio in quest'ultimo contesto che si inserisce lo scopo del seguente studio. Una parte dell'elaborato tratta della creazione di filtri antiparticolato con la tecnica dell'electrospinning per i quali sono stati impiegati polimeri biodegradabili e solventi con tossicità ridotta. I campioni prodotti sono poi stati testati al fine di determinarne l'efficienza di filtrazione. La seconda parte dello studio invece riporta i test effettuati su filtri prodotti da un gruppo di ricerca esterno, usando materiali tradizionali e, per una serie di questi, l'electrospinning.

Parte teorica

1. Particolato atmosferico

Il particolato si compone delle particelle liquide o solide che ritroviamo in atmosfera e può essere differenziato in funzione della dimensione, origine nonché composizione che influenzano densità, forma ecc.

Parlando di origine è possibile fare una prima differenziazione tra:

- **naturale** formandosi a seguito di un incendio, un'eruzione vulcanica, spray marino, erosione del suolo e in questa categoria vi ricadono anche polline, spore ecc.
- **antropica** a seguito della combustione di carburanti quali carbone, gasolio ma anche la semplice azione di frenata di un mezzo così come l'attrito tra le ruote e l'asfalto.

Il particolato può inoltre essere suddiviso in:

- **primario** quando viene emesso in atmosfera direttamente dalla sorgente
- **secondario** quando si origina a seguito di processi chimico-fisici subiti da sostanze già presenti in atmosfera (1)

La sorgente dalla quale il particolato si genera è perciò alla base delle sue caratteristiche che si tratti di dimensioni o di composizione chimica. Detto ciò, un parametro importante da considerare, come detto in precedenza, è relativo alle dimensioni del particolato o ancor meglio il diametro. Quando si parla di diametro del particolato ci si riferisce al Diametro aerodinamico equivalente (D_a) ovvero *“diametro di una particella sferica, di densità unitaria, dotata dello stesso comportamento aerodinamico (stessa velocità di sedimentazione) della particella in esame in aria calma, nelle stesse condizioni di temperatura, pressione e umidità relativa”* (1)

Le particelle vengono così suddivise in tre categorie dai termini anglosassoni coarse, fine e ultrafine:

- **coarse** ovvero particelle grossolane che hanno $2.5 \mu\text{m} < D_a < 100 \mu\text{m}$
- **fine** del quale fanno parte le particelle con $0.1 \mu\text{m} < D_a < 2.5 \mu\text{m}$
- **ultrafine** $0.0025 \mu\text{m} < D_a < 0.1 \mu\text{m}$ (1)

L'altro aspetto importante che viene influenzato dalla sorgente, come suddetto, è la composizione chimica. Difatti ritroviamo: solfati (SO_4^{2-}), nitrati (NO_3^-), composti del C sia in forma inorganica che organica, acidi (H^+), elementi come silicio (Si), alluminio (Al), ferro (Fe), magnesio (Mg) e potassio (K) tipici, ad esempio, dell'erosione del suolo nonché metalli pesanti come piombo (Pb), arsenico (As), vanadio (V) ecc. (2-4). Le particelle possono inoltre rappresentare una superficie su cui altre specie chimiche che ritroviamo in atmosfera possono

adsorbirsi, come composti a base di carbonio quali Idrocarburi Policiclici Aromatici (IPA), metalli e materiale di origine biologica come batteri e virus (5).

1.1 Interazione particolato – corpo umano ed effetti sulla salute

Storicamente c'è un evento che ha dato il via agli studi sull'interazione tra questo inquinante e il corpo umano ovvero il Grande Smog di Londra del 1952 (6). All'epoca si verificò un'inversione termica che intrappolò i prodotti delle fabbriche, riscaldamento e mezzi rendendo l'aria irrespirabile. A seguito dell'esposizione dei cittadini a questo mix di inquinanti si registrarono 3000 vittime, ma in realtà furono molte di più, per non parlare degli effetti a lungo termine di coloro che sono stati esposti all'evento (7).

Nel precedente paragrafo ho parlato della classificazione per diametro di questo inquinante, ma ritengo necessario affiancare a quei numeri la seguente immagine (Figura 1) di modo da rendere qualcosa di astratto il più concreto possibile. La foto compara un capello con il particolato ed è evidente la forte differenza in termini di dimensioni. Considerato ciò appare chiaro che sia in grado di entrare più o meno in profondità nell'apparato respiratorio e non solo.

In funzione di ciò sono state identificate tre frazioni:

- **inalabile** che viene bloccata da naso-laringe
- **toracica** si deposita oltre la laringe (1)
- **respirabile** che riesce a penetrare in profondità fino agli alveoli (8)

Recentemente è stato pubblicato un report europeo che afferma come nell'anno 2020 in UE, sono state registrate ben 238000 morti premature dovute al superamento dei limiti di particolato definite nelle linee guida del World Health Organization (WHO) (9).

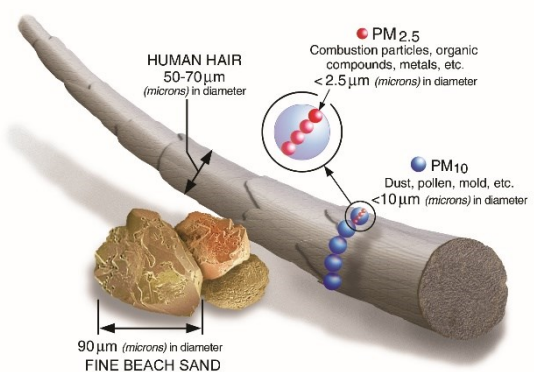


Figura 1: Confronto tra capello umano e particolato

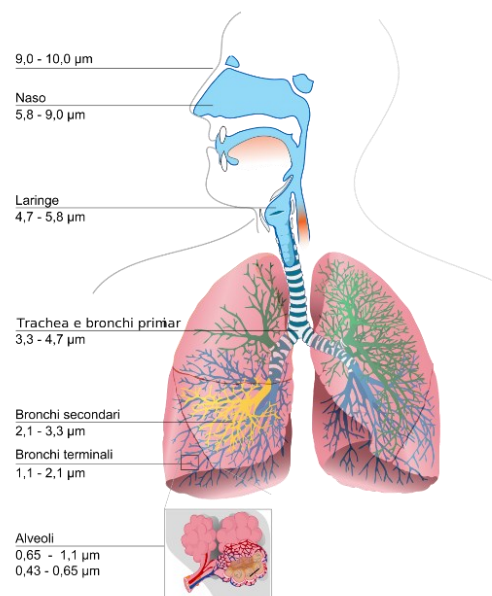


Figura 2: Rappresentazione apparato respiratorio

Questo dato mostra quanto questo inquinante sia problematico e negli anni sono stati numerosi gli studi che ne hanno ricercato gli effetti. L'apparato respiratorio che si tratti di un'esposizione acuta o cronica è indubbiamente il più colpito, seguito poi dall'apparato cardiocircolatorio. Per quanto riguarda il primo si passa da tosse, bronchiti, in generale infiammazioni, a respiro corto (8,10) e dopo esposizioni prolungate anche cancro, (8,10–12) soprattutto in zone dove il particolato è composto o associato a metalli pesanti e composti organici notoriamente cancerogeni come gli IPA (4). In merito al secondo invece si è visto un peggioramento generale dell'apparato cardiocircolatorio, aritmie, infarti, assieme ad un aumento della pressione sanguigna (11). Uno studio nello specifico è andato ad analizzare il PM 0.1 che riuscendo, grazie alle sue dimensioni, ad entrare nel circolo sanguigno è in grado di raggiungere indisturbato organi e tessuti (4). Questo si traduce nell'avere problematiche generalizzate tanto che in alcuni elaborati si parla anche di variazioni metaboliche (11), nonché problemi neurologici (13) e nascite premature (11).

Gli studi esaminati fanno poi un'importante differenziazione tra ambiente indoor ed ambiente outdoor data l'eterogeneità delle sorgenti nei due casi (1,10,12).

In conclusione è possibile affermare che gli effetti del particolato dipendono non solo dalle caratteristiche dell'inquinante stesso, ma anche dall'ambiente circostante per non parlare dello stile di vita, abitudini nonché dalle caratteristiche fisiche della persona (10).

1.2 Ambiente esterno (outdoor)

L'ambiente outdoor ingloba tutto ciò che non è un ambiente confinato e questo comporta la presenza della quasi totalità delle sorgenti di particolato naturali ed antropogeniche, traducendosi in una forte eterogeneità del materiale aerodisperso sia in termini di diametro che di composizione chimica. Parlando però di ambiente outdoor le cose si complicano ulteriormente perché le condizioni meteo influenzano il particolato ed il suo comportamento in ambiente. L'elaborato (2) spiega come il vento sia un parametro che causa risospensione e trasporto delle particelle soprattutto fini ed ultrafini, che possono rimanere in atmosfera per tempi molto lunghi ed essere trasportate per centinaia di chilometri. Le particelle con una granulometria maggiore risentono meno della sua azione difatti tendono a depositarsi in tempi brevi. La pioggia o la neve sono elementi altrettanto importanti in quanto comportano una riduzione della concentrazione di particolato. Questo fenomeno prende il nome di deposizione umida.

1.3 Ambiente interno (indoor)

Un ambiente indoor è uno spazio confinato ed il Ministero della salute (14) riporta come esempi:

- abitazioni
- uffici pubblici e privati
- strutture comunitarie (ospedali, scuole, uffici, caserme, alberghi, banche)
- ambienti destinati ad attività ricreative e sociali (cinema, bar, ristoranti, negozi, strutture sportive)
- mezzi di trasporto pubblici e/o privati (auto, treno, aereo, nave, etc)

Le persone trascorrono la maggior parte del tempo in ambienti chiusi per studio, lavoro, tempo libero e ciò richiederebbe avere una buona qualità dell'aria nei vari spazi ma questo non sempre è vero. La qualità dell'aria indoor dipende da quella outdoor (1,4,11) dato che tramite una finestra, una porta l'aria da fuori tenderà ad entrare. Sono presenti una serie di sorgenti aggiuntive la cui influenza non è trascurabile come ad esempio la cucina, le pulizie, i riscaldamenti, il fumo, mobili ecc. (1,4,10–12,15). Per quanto riguarda cucina e riscaldamenti la causa scatenate è la combustione, che abbiamo già visto essere una delle sorgenti di particolato e molecole con elevata tossicità (12). Le pulizie causano l'immissione di altri composti chimici come la formaldeide presente in alcuni detergenti. Questa molecola può essere rilasciata da mobili nuovi (12) o vernici appena usate peggiorando ulteriormente la qualità dell'aria indoor. Finora ho citato sorgenti antropogeniche di inquinanti indoor che possono essere considerate particolato o comunque possono legarsi ad esso, ma volendone citare uno di origine naturale di un certo rilievo non posso non citare il radon. Il Radon è un gas radioattivo che si genera dal decadimento dell'uranio. Non è raro trovarne delle concentrazioni importanti in alcune zone dato che si trova naturalmente nella crosta terrestre. Trattandosi di un gas riesce facilmente ad entrare negli edifici presenti soprattutto nelle cantine o in generale piani interrati. Questo gas normalmente non rappresenta un problema perché nonostante venga inalato, la maggior parte viene espulso prima del suo decadimento a seguito del quale rilascia particelle α . Queste particelle vengono facilmente bloccate dalla pelle, ma i prodotti del decadimento possono sfruttare il particolato come substrato per entrare nel nostro organismo, e al rilascio delle particelle avremo il massimo danno possibile (16). Infine il fumo di sigaretta, non solo rappresenta una fonte di inquinamento, sia di particolato che composti organici (12) e metalli (6), ma rende più vulnerabili i fumatori.

Considerato ciò appare chiaro come prima di tutto l'obiettivo sia ridurre il più possibile le sorgenti e di conseguenza gli inquinanti rilasciati outdoor assieme ad alcuni indoor. Non essendo però possibile agire sulle sorgenti di tutti gli inquinanti, l'alternativa rimane quindi puntare su una progettazione più consapevole degli spazi, oppure sfruttare dei sistemi di aerazione dotati di appositi filtri. La soluzione base è la ventilazione perché è stato dimostrato come in luoghi dove risulta essere scarsa ci sia una maggiore incidenza di malattie respiratorie (17). La ventilazione può essere fatta sia naturalmente, puntando sulla progettazione, che forzata o ancor meglio ibrida, così da ridurre la domanda di energia elettrica (17). Quando si installa un sistema di aerazione c'è una cosa importante a cui far attenzione ovvero la sua manutenzione perché, nonostante possa sembrare di poca importanza, in realtà è un punto cardine. In passato, ci sono stati casi in cui una cattiva manutenzione dei filtri e dei condotti di aerazione ha comportato un peggioramento della percezione della qualità dell'aria, oltre a non permettere un effettivo miglioramento degli ambienti indoor (18).

1.4 Meccanismi filtro-particolato

Lo scopo dello studio, come detto, è quello di testare e sviluppare dei filtri ma è importante conoscere le interazioni tra il particolato ed il filtro grazie alle quali la filtrazione stessa avviene. I meccanismi che si possono verificare sono:

- **Intercettazione** → le particelle tendono a seguire le correnti d'aria ma si possono instaurare delle forze secondarie con il filtro come le forze di van der Waals (19)
- **Impatto inerziale** → avviene quando particelle di più grandi dimensioni e quindi con un peso maggiore non riescono a seguire l'andamento del flusso d'aria impattando sull'ostacolo, ovvero il filtro, invece che passarci attorno a differenza delle particelle più piccole (20)
- **Diffusione** → cattura le particelle di piccole dimensioni che si muovono secondo i moti browniani ovvero i movimenti disordinati di queste particelle che potrebbero di conseguenza venire in contatto col filtro (19)
- **Interazione elettrostatica** → se le particelle ed il filtro presentano delle cariche elettriche queste verranno attratte e bloccate (19)
- **Gravità** → le particelle con diametro maggiore risentiranno maggiormente della forza di gravità e potrebbero depositarsi sul filtro (20)
- **Straining** → avviene quando una particella entra in un filtro i cui pori sono di dimensioni minori del diametro della particella stessa (21)

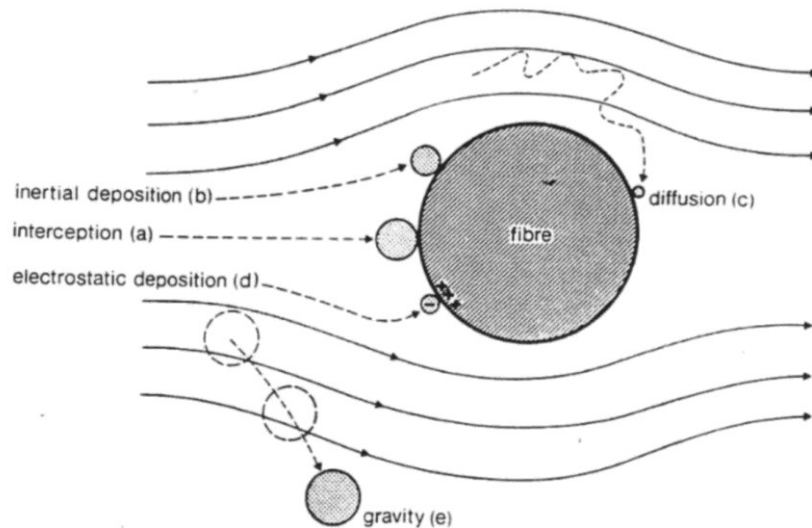


Figura 3: Rappresentazione meccanismi fibra-particolato

1.5 Legislazione

Per quanto riguarda l'aspetto normativo sono state identificate due classi di particolato come indicatori della qualità dell'aria outdoor ed indoor ovvero il PM 10 ed il PM 2.5.

PM 10 → “si intende l'insieme delle particelle prelevate con un sistema d'aspirazione avente un'efficienza di cattura pari al 50% in corrispondenza d'un diametro aerodinamico di $10 \mu\text{m}$ e tendente al 100% per diametri maggiori”(1)

PM 2.5 → “si intende l'insieme delle particelle catturate con un sistema avente un'efficienza del 50% per un diametro aerodinamico di $2,5 \mu\text{m}$ ”(1)

Nel 2010 in Italia viene pubblicato il D.Lgs. 155 del 13 agosto 2010 come attuazione della Direttiva 2008/50/CE relativa alla qualità dell'aria ambiente e per un'aria più pulita in Europa. La parte che più ci interessa del decreto è l'allegato XI in quanto riporta i limiti di PM 10 e PM 2.5 che devono essere rispettati.

Tabella 1: Estratto Allegato XI del D.Lgs. 155 del 13 agosto 2010

 PM10 **

1 giorno	50 µg/m ³ , da non superare piu' di 35 volte per anno civile	50 % il 19 luglio 1999, con una riduzione il 1° gennaio 2001 e succes- sivamente ogni 12 mesi secondo una percentuale annua costante fino a raggiungere lo 0 % entro il 1° gennaio 2005
----------	---	---

Anno civile	40 µg/m ³	20 % il 19 luglio 1999, con una riduzione il 1° gennaio 2001 e succes- sivamente ogni 12 mesi secondo una percentuale annua costante fino a raggiungere lo 0 % entro il 1° gennaio 2005
----------------	----------------------	--

 PM2,5

FASE 1

Anno civile	25 µg/m ³	20% l'11 giugno 2008, con riduzione il 1° gennaio successivo e successivamente ogni 12 mesi secondo una percentuale annua costante fino a raggiun- gere lo 0 % entro il 1° gennaio 2015
----------------	----------------------	---

2. Electrospinning

La tecnica dell'electrospinning è diventata sempre più conosciuta ed usata negli ultimi anni, come dimostrato dai numerosi studi presenti, in quanto permette di creare filtri che a parità di efficienza hanno cadute di pressione inferiori e meglio gestibili. L'articolo (22) presenta in modo molto chiaro ed approfondito ciò che c'è alla base di questa tecnologia e le infinite possibilità che offre. La tecnica si basa sull'utilizzo di un polimero, che può essere in soluzione, fuso, ecc. e che deve avere una caratteristica fondamentale, ovvero una certa conduttività. Il polimero viene messo in una siringa posta poi in una pompa che permetterà l'estrusione del polimero stesso con un flusso costante impostato dall'operatore. La siringa è a sua volta collegata con un tubo che culmina con un ago metallico. Gli aghi differiscono per diametro e per numero ed è possibile lavorare con uno o più aghi in contemporanea. La struttura su cui è montato l'ago ed il collector su cui andranno a depositarsi le fibre prodotte, sono legati a fili elettrici, portando così alla formazione di un campo elettrico. Il polimero fuoriuscendo dall'ago forma una goccia a causa della tensione superficiale. La goccia, essendo composta da materiale caratterizzato da una certa conducibilità, risentendo del campo elettrico, si modificherà dando origine al cono di Taylor. Dalla punta del cono si formerà poi un getto carico di polimero che darà così origine alla fibra vera e propria. La fibra allungandosi diventerà instabile dando così origine ad un movimento caotico, come mostrato dallo schema sottostante (Figura 4). La fibra, raggiunto il collector, si asciugherà per la volatilizzazione del solvente usato e si stratificherà formando il filtro.

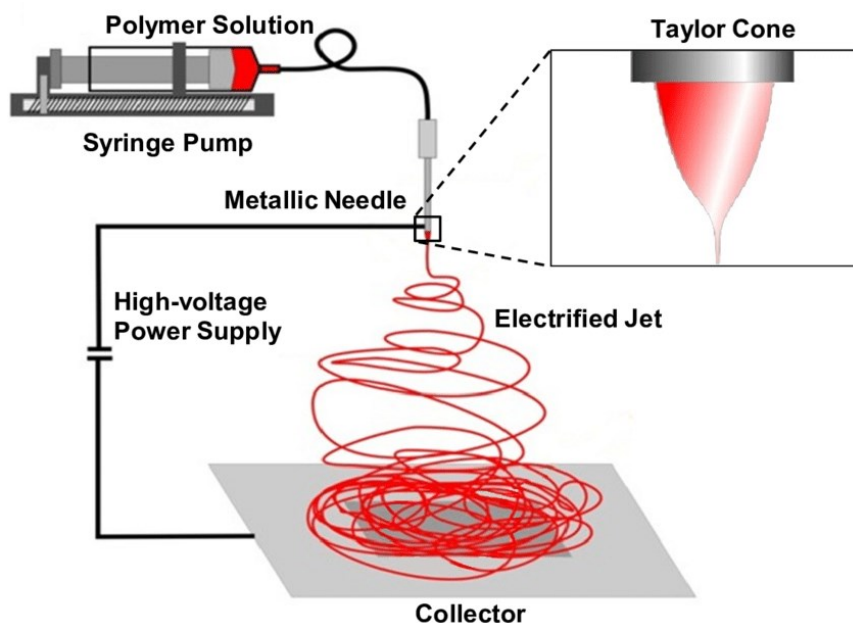


Figura 4: Schema e funzionamento dell'electrospinning

Lavorando con l'elettrospinning ci sono dei parametri fondamentali dai quali dipendono le caratteristiche e la buona riuscita del filtro ovvero:

- Flusso
- Voltaggio
- Distanza ago-collector
- Temperatura
- Umidità relativa
- Polimero e solvente

Maggiore è il flusso maggiore sarà il diametro delle fibre.

Per il voltaggio, invece, è vero il contrario infatti più è alto più le fibre saranno sottili anche se, in alcuni casi, quando risulta essere troppo alto può portare ad una fuoriuscita maggiore di polimero comportando quindi la formazione di fibre spesse.

La distanza ago-collector lavora come il voltaggio, quindi più è elevata più il diametro delle fibre sarà ridotto.

Il polimero riveste un ruolo altrettanto importante, sia per le sue caratteristiche intrinseche, che influenzeranno le future applicazioni del filtro, sia per la sua lavorazione in quanto, usando differenti solventi, si possono ottenere soluzioni più o meno facili da trattare. Questo aspetto dipende anche dalla combinazione di parametri applicati che, non solo influenzeranno il processo di creazione del filtro, ma permetteranno di creare la tipologia di fibre desiderate. Utilizzando la stessa soluzione perciò, è possibile creare nanofibre con strutture e diametri differenti, più o meno omogenei, ottenendo di conseguenza filtri con pori di dimensioni minori o maggiori.

Temperatura ed umidità relativa sono fondamentali, perché una temperatura elevata agisce sulla viscosità del polimero e sulla tensione superficiale il che, da un lato favorisce la creazione di fibre più sottili, ma dall'altro comporta un'evaporazione più rapida del solvente perciò, le fibre si asciugheranno più velocemente riducendo l'estensione del getto di polimero.

L'umidità relativa allo stesso modo se risulta essere troppo bassa fa accelerare l'evaporazione del solvente, invece se al contrario sarà troppo elevata rallenterà il processo e si solubilizzerà nel getto di polimero andando a modificare la struttura delle fibre.

Questa tecnica quindi si presenta tanto versatile quanto complessa perché, da un lato è possibile impiegare qualsiasi tipo di polimero, sintetico o organico che sia, al quale è possibile aggiungere anche additivi di modo da renderlo specifico per certe classi di inquinanti, ma dall'altro è difficile combinare nel modo migliore tutti i parametri sopradescritti.

I filtri elettrofilati essendo composti da nanofibre possono presentare anche altre criticità come una scarsa resistenza meccanica (19) e alle alte temperature. Pensando poi all'asbesto sappiamo che se le dimensioni delle sue fibre rispettano determinate proporzioni possono essere inalate, e lo stesso potrebbe verificarsi in questo caso quindi sono necessari studi approfonditi in merito (22). Altro aspetto da non tralasciare, soprattutto se si desidera impiegare i filtri creati in ambienti indoor o come mascherine, è la tipologia di solvente che si impiega perché nelle fibre potrebbero rimanerne delle tracce (19).

3.Osservazione filtri

Al fine di determinare le caratteristiche dei filtri creati sono stati osservati con lo Scanning Electron Microscope (SEM). Questa tipologia di microscopi si basa sull'utilizzo di un fascio di elettroni che portano ad uno stato di eccitazione gli atomi del campione e l'energia liberata dagli stessi, per tornare ad uno stato stabile, è sottoforma di raggi X che vengono captati dal rilevatore presente. Questa tecnologia richiede inoltre che nello spazio dove vengono posti i campioni e dove è presente anche il sistema di lenti ed il rilevatore ci sia il vuoto, di modo da non compromettere il fascio di elettroni. Questo processo permette di ottenere un'immagine delle strutture del campione anche nell'ordine dei nanometri. La porzione di campione prelevata va posizionata su un apposito supporto dotato di un adesivo in carbonio, per poi essere sottoposta ad un trattamento con metallizzatore. Questo strumento permette di creare una copertura di elementi conduttivi come oro, cromo ecc. sulla superficie trattata. Alla base del suo funzionamento abbiamo l'entrata nella camera, dov'è presente il campione, di argon ionizzato che colpendo la lastra di oro, nel nostro caso, ne comporta il rilascio di ioni di metallo che vanno a depositarsi sul materiale da analizzare. Questo processo si rende necessario per tre ragioni (23):

- ottenere un'immagine migliore
- proteggere il campione dal fascio di elettroni accelerato che porta con sé un quantitativo importante di energia soprattutto se si lavora con materiale biologico
- osservare materiali che non sono conduttivi per i quali il SEM sarebbe inutile

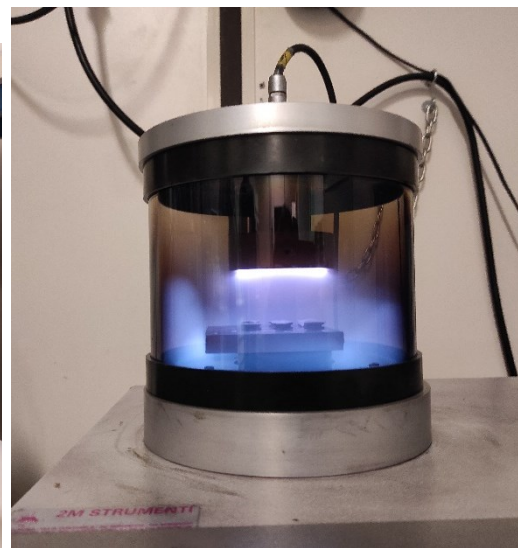


Figure 5 e 6: Metallizzatore

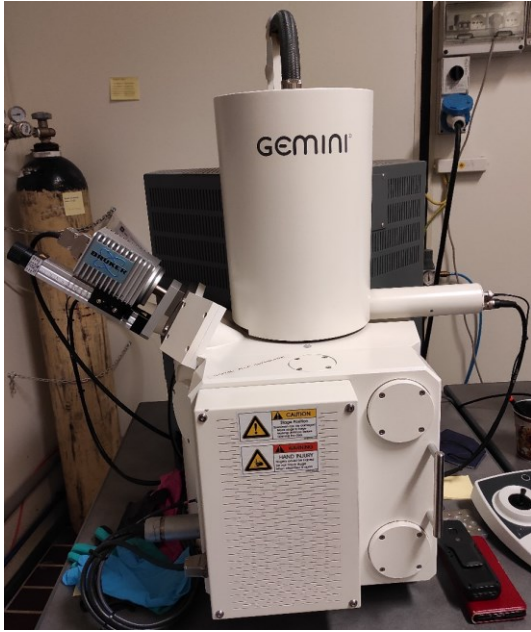


Figura 7: SEM PHILIPS XL20

Parte sperimentale

4. Electrospinning

4.1 Strumenti, materiali, procedura di elettrofilatura e procedure di prova

4.2 Strumenti:

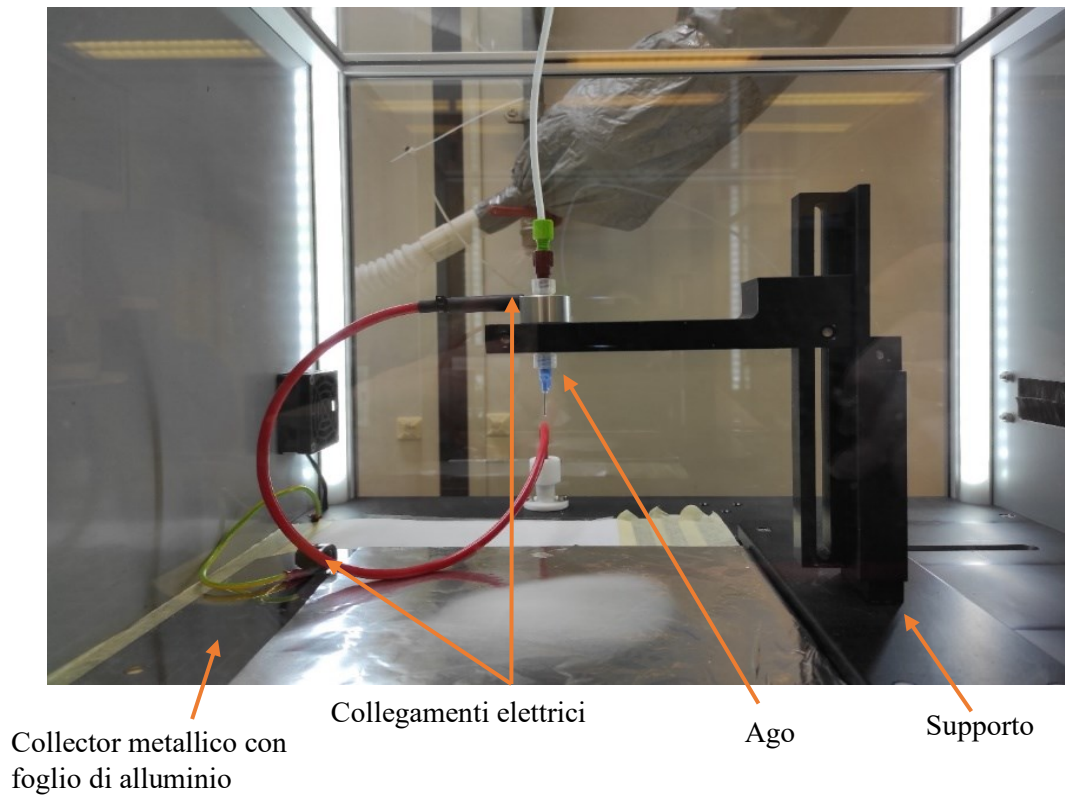
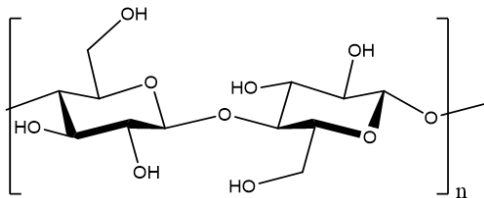


Figura 8: Box electrospinning



Figura 9: Pompa con siringa contenente il polimero

La cellulosa microcristallina può essere ottenuta come i polimeri sopracitati da diverse fonti cellulose. Questa forma di cellulosa è biocompatibile, non tossica, biodegradabile, stabile termicamente ecc. Queste caratteristiche l'hanno resa molto comune nell'industria farmaceutica, alimentare e cosmetica (27).



Monomero 3

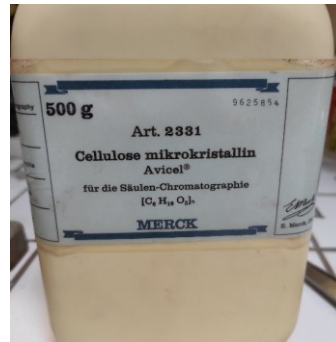


Figura 12: Cellulosa microcristallina

4.4 Procedure di elettrofilatura:

- Preparare lo strumento lavando ago e tubo con il solvente usato per creare la soluzione con cui si lavora
- Posizionare un foglio di alluminio al di sopra del collector e collegarlo al filo interno allo strumento di modo da permettere il passaggio di corrente
- Aspirare con una siringa 10 mL del polimero da utilizzare, assicurandosi che non siano presenti bolle d'aria ed eliminare eventuali residui di solvente per poi porla nell'apposita pompa
- Impostare i parametri di processo quali voltaggio [kV] e flusso [mL/min]
- Determinare inoltre temperatura (T) ed umidità relativa (Ur) nei pressi dello strumento ed iniziare la creazione del filtro
- Durante la filatura c'è la possibilità che si creino dei piccoli accumuli di polimero sull'ago quindi qualora ciò si verifici è necessario eliminarli per evitare che cadano sul filtro

Tabella 2: Riferimenti bibliografici

N°	Polimero/ solvente	V [kV]	T [°C]	Ur [%]	Flusso	Distanza [cm]	Caratteristiche filtro	Ref.
1	12,5% w/V CA in acetone	14,8	21 ± 0,5	37 ± 3	1 mL/min	9	Fibre a nastro. Diametro medio fibre 4,2 µm	Roberta Orlando, Buildings 2021, 11, 557

2	CA 10% wt/V in acetone/acqua (80/20 V/V)	25	/	/	3 mL/h	15	Diametro medio fibre: 780 ± 110 nm	P.B. Tsekova et al. / Materials Science and Engineering C 73 (2017) 206–214
3	CA 9%, 11%, 13% e 15% w/V in acetone/acqua (80/20) tipo A e in acetone/acqua (90/10) tipo B	20 – 22	/	/	2 – 4 mL/h	12 – 15	Diametro medio fibre: 300 – 600 nm	P.K. Chakraborty et al. / International Journal of Biological Macromolecules 122 (2019) 644–652
4	12% PLA in cloroformio ed acetone (2:1) a cui è stata aggiunta MC nelle seguenti concentrazioni: 1%, 3%, 5%	22 24 26	/	/	0,2 mL/h	15 18 20	15 cm: fibre a forma di nastro appiattite ma aumentando il voltaggio il diametro è diminuito 18 cm: le microfibre sono più simmetriche ma sono ancora presenti imperfezioni e all'aumentare del voltaggio risultano più allungate ed il diametro diminuisce 20 cm: fibre omogenee e senza imperfezioni a 26 kV	Gaitán et al. (2018). "Electrospun PLA & MCC," BioResources 13(2), 3659-3673
5	10% PLA w/V in acetone	20	~20		1 mL/h	15	Diametro medio nanofibre: 757 ± 275 nm	R. Casasola et al. / Polymer 55 (2014) 4728e4737

Tabella 3: Polimeri, solventi e parametri usati per la creazione dei filtri e condizioni ambientali registrate

Test	Data	Polimero/solvente	V [kV]	T [°C]	Ur [%]	Flusso [ml/min]	Distanza [cm]	Ø ago [mm]	mL erogati	Collector
1	13/03 /2023	PLA 13% in acetone	i → 10,0 f → 20,0	21	43	i → 0,025 f → 0,07	10	0,72	5	Orizzontale
2	15/03 /2023	PLA 13% in acetone + 2,5% MC	20,0	19	48	0,07	10	0,72	8	Orizzontale
3	17/03 /2023	PLA 13% in acetone + 2,5% MC	20,0	19	37	0,07	10	0,72	6	Orizzontale
4	28/03 /2023	CA 12,5% in acetone	14,8	21	31	1	9	1,6	9	Orizzontale
5	3/04 /2023	PLA 13% in acetone	20,0	22	38	0,07	9	0,91	9	Orizzontale
6	4/04 /2023	PLA 13% in acetone	20,0	22	29	0,07	9	0,91	9	Orizzontale

7	5/04 /2023	PLA 13% in acetone + 5% MC	20,0	21	30	0,07	10	0,72	5	Orizzontale
8	8/05 /2023	CA 12,5% in acetone	14,8	25	56	1	9	1,6	9	Orizzontale
9	8/05 /2023	CA 12,5% in acetone	14,8	25	54	1	9	1,6	9	Verticale
10	8/05 /2023	CA 12,5% in acetone	14,8	25	52	1	9	1,6	9	Verticale
11	8/05 /2023	CA 12,5% in acetone	14,8	25	50	1	9	1,6	9	Verticale

Per questa ricerca, al fine di creare dei filtri sfruttando l'acetato di cellulosa, sono stati consultati diversi articoli, e quello selezionato è l'1 (Tabella 2). Osservando la Tabella 3, si può però vedere che una condizione è stata modificata durante le prove perché si sono verificati una serie di problemi usando quella soluzione. Il biopolimero, una volta solubilizzato, ha dato origine ad una soluzione estremamente viscosa che ha reso la filatura difficile. Il primo filtro è stato fatto senza problemi, ma lo stesso giorno non è stato possibile fare una replica, dato che la soluzione non appena raggiungeva l'ago tendeva ad asciugarsi in fretta. Considerate le problematiche riscontrate si è optato per un cambio di soluzione. Questa volta ne è stata creata una analoga a quella descritta nell'articolo 2 (Tabella 2), ed i parametri sono stati modificati sempre seguendo l'elaborato. Nella tabella presentata (Tabella 3) non si fa menzione di filtri di questo genere, perché si è presentato nuovamente il problema dell'asciugatura della soluzione a livello dell'ago, ma in questo caso la situazione è ancor peggiore della precedente. Il punto forte di questa soluzione è indubbiamente la possibilità di usare meno solvente organico perché in parte sostituito dall'acqua. Si è deciso di tentare ancora cambiando prima la concentrazione di polimero riducendola all'8% e poi al 6,75%, ma con gli stessi parametri non è stato comunque possibile creare filtri utilizzabili. L'ultimo tentativo è stato quello di cambiare tutti i parametri ma anche questo non ha prodotto i risultati sperati. A seguito di queste prove, abbiamo deciso di utilizzare nuovamente la prima soluzione ma si è verificato il solito problema, e per ovviare a ciò è stata sottoposta ad ultrasuoni per 15' (Figura 13), ma anche dopo questo trattamento



Figura 13: Soluzione 12,5% CA in acetone tratta con ultrasuoni

non ci sono stati cambiamenti apprezzabili. L'ultima prova durante la quale è stata usata la medesima soluzione è stata fatta il giorno 8/05/2023, ma come si evince dalla Tabella 3, è stata registrata un'umidità relativa oltre il 50% e questo ha dato origine ad un nuovo problema perché

se all'inizio il polimero tendeva a bloccarsi nell'ago, in queste condizioni gocce di materiale hanno iniziato ad uscire incontrollate compromettendo il filtro sottostante. Per ovviare a questo è stato cambiato l'assetto dello strumento, spostando il collector da una posizione orizzontale ad una verticale, inoltre per contrastare l'elevata umidità, sono stati posizionati due becker contenenti gel di silice nel box ed esternamente un deumidificatore, come si può vedere dall'immagine sottostante (Figura 14).

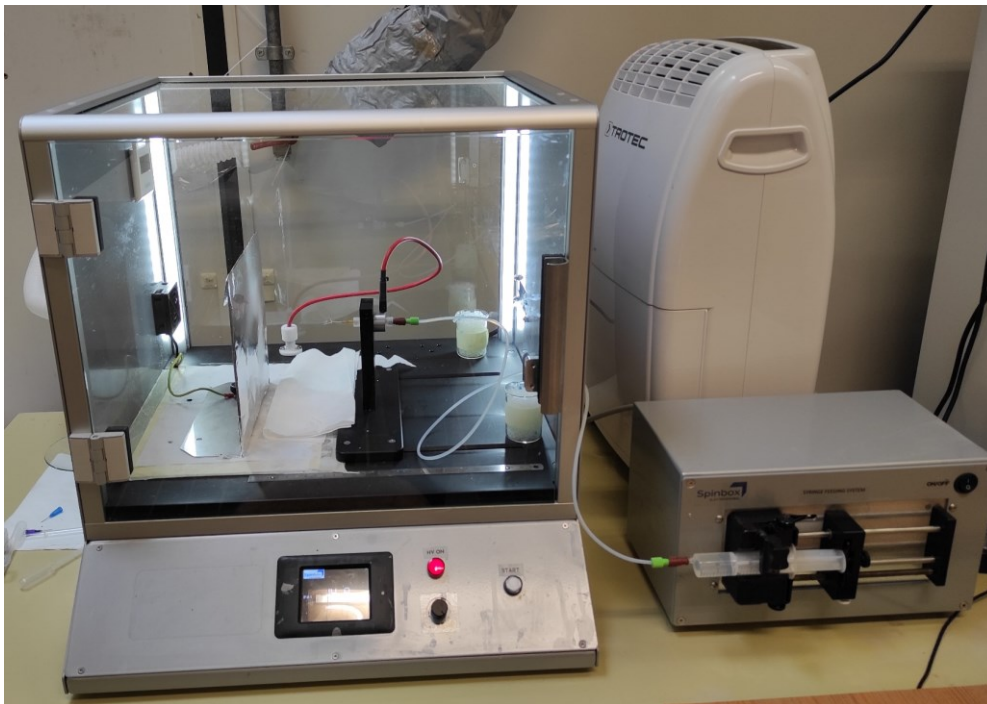


Figura 14: Modifiche fatte per la produzione di filtri nella giornata 8/05/2023

Lavorare con questo strumento ha dimostrato quanto le condizioni ambientali influenzino la buona riuscita dei filtri, dato che in generale tutte le soluzioni impiegate hanno dimostrato una dipendenza da questi più o meno forte. Si rende quindi necessario lavorare in un ambiente climatizzato, perché c'è una forte probabilità che il fallimento della seconda soluzione di CA sia legato proprio dall'impossibilità di controllare T ed Ur.

La cellulosa microcristallina è caratterizzata da una bassa solubilità in alcuni solventi organici, acetone compreso, per non parlare della totale insolubilità in acqua. Producendo filtri con la soluzione 13% PLA + 5% MC in acetone, dopo ore di lavoro, si è difatti formato un precipitato (Figura 15) ma è in realtà un fenomeno prevedibile e difficilmente può essere evitato date le sue caratteristiche.



Figura 15: Focus sulla formazione di precipitato per la soluzione 13% PLA + 5% MC in acetone

4.5.1 Testing filtri:

4.5.2 Strumenti e materiali:

Per testare i filtri è stata creata una stanza di 12 m³ nella quale sono presenti due ventilatori, che permettono di omogenizzare l'aria al suo interno, assieme all'umidificatore dov'è contenuta la soluzione al 3% (w/V) di NaCl per riprodurre l'inquinante da testare. Per evitare perdite di particolato, è stato messo dello scotch lungo il perimetro della porta della stanza.

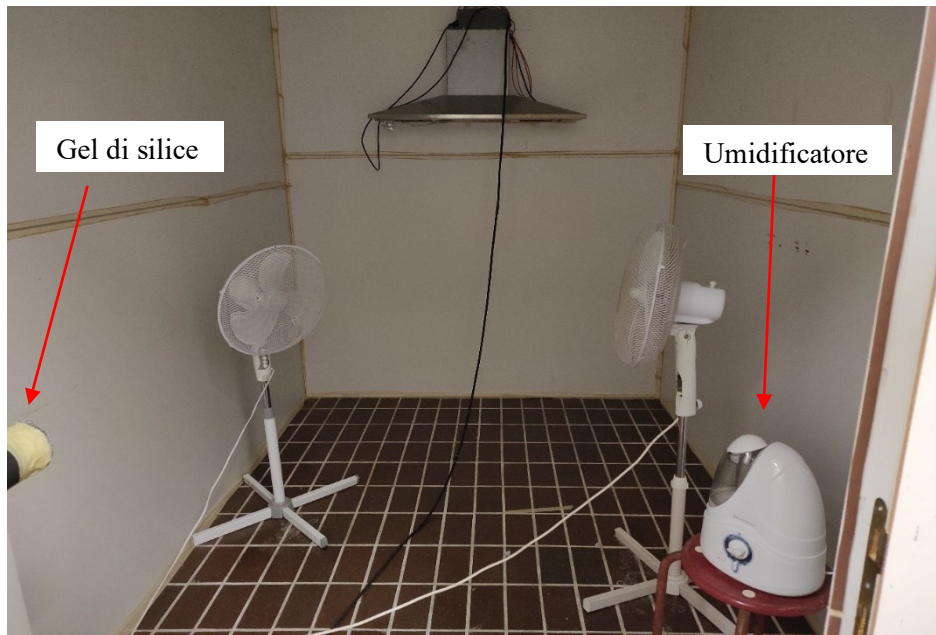
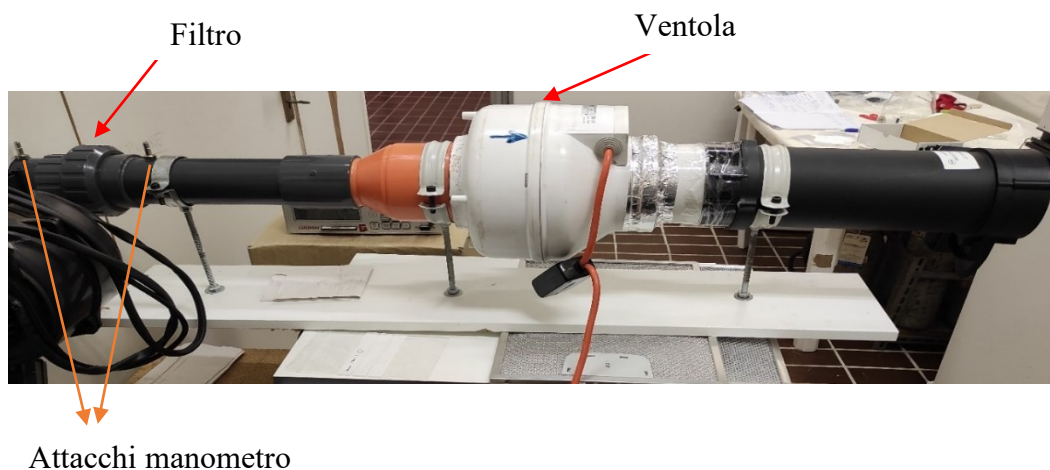


Figura 16: Interno stanza

Il sistema dov'è stato posto il filtro per eseguire il test è invece composto da un tubo in PVC. Il tubo è parzialmente inserito nella stanza ed in testa è presente un supporto contenente del gel di silice, che permette di bloccare in buona parte l'acqua vaporizzata dall'umidificatore evitando che un quantitativo eccessivo arrivi sul filtro, compromettendo il campione e di conseguenza la prova.



Attacco contatore di particelle GRIMM

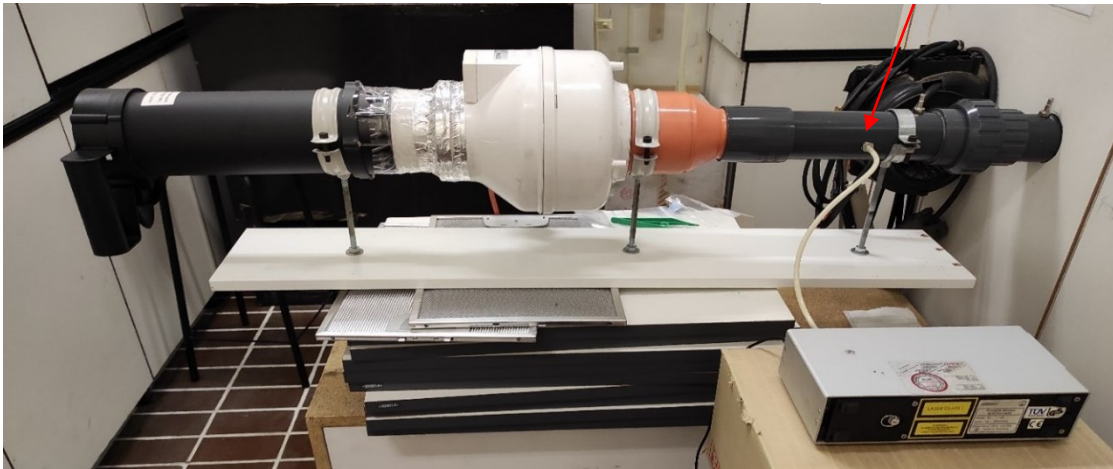


Figura 17 e 18: Sistema usato per il testing dei filtri

Considerando il resto del sistema è presente la sezione dove va inserito il filtro, compresa tra gli attacchi dove andrà collegato il manometro per determinare la temperatura alla quale si sta lavorando e la differenza di pressione generata dal campione. Poco dopo è presente anche l'attacco per il contatore di particelle GRIMM (Portable Aerosol Spectrometer), uno strumento che permette di sapere due informazioni fondamentali ovvero, il numero di particelle che passano per quel punto e la loro dimensione. In questo caso specifico l'acquisizione dei dati viene fatta ogni minuto. L'ultima parte del sistema è stata aggiunta per poter misurare con l'anemometro la velocità del flusso d'aria.

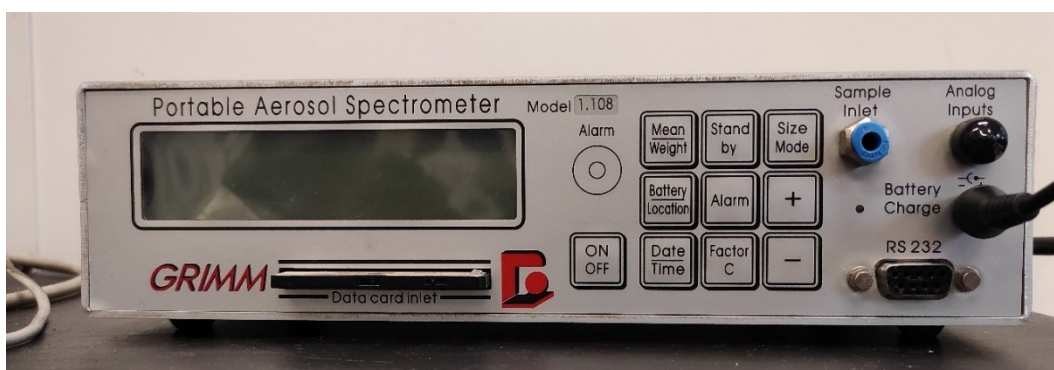


Figura 19: Contatore di particelle GRIMM

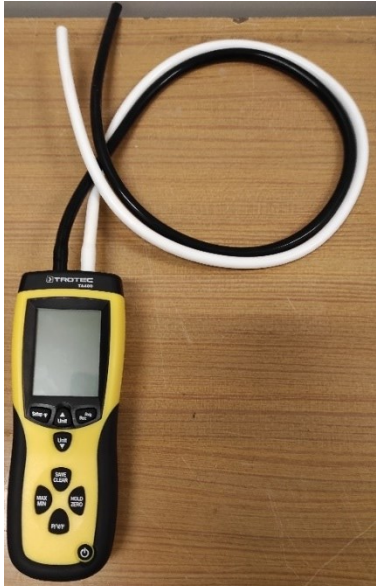


Figura 20: Manometro



Figura 21: Anemometro



Figura 22: Supporto per il filtro in PLA

4.5.3 Procedure di prova test filtri:

- Inserire 50 g di gel di silice nell'apposito supporto e collocarlo in testa al tubo (cambiarlo ad ogni prova)
- Avviare i ventilatori nella stanza e sigillare la porta
- A seguito dell'accensione del GRIMM verificare che la concentrazione di particelle misurata sia al di sotto di $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$
- Raggiunta la suddetta concentrazione accendere l'umidificatore
- Attendere che le particelle arrivino intorno ai $25000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e spegnere l'umidificatore
- Attendere che la concentrazione di particelle scenda attorno ai $20000 \mu\text{g}/\text{m}^3$
- Mettere il filtro assieme al supporto ed aspettare 7'
- Misurare la velocità del flusso d'aria
- Trascorso il tempo necessario togliere il filtro ed attendere altri 5' prima di concludere la prova
- Inserire nuovamente il filtro e misurare la caduta di pressione e la temperatura
- Durante tutto il processo è necessario segnare l'orario di accensione dell'umidificatore, dell'immissione del filtro e quando viene tolto e ciò servirà durante l'elaborazione dati

Per l'esecuzione dei test è stata consultata la normativa europea **EN 149:2001 + A1:2009**. La soluzione da usare per riprodurre il particolato prevede l'utilizzo di NaCl, il flusso d'aria aspirato dalla ventola deve essere pari a 95 L/min (28) e a seguito del test il range di caduta di pressione accettabile è compreso tra 210 e 300 Pa come mostrato nella [Tabella 4](#).

Tabella 4: Estratto normativa EN 149:2001 + A1:2009 che riporta i valori di resistenza respiratoria massima per le tre categorie di mascherine

BS EN 149:2001+A1:2009
EN 149:2001+A1:2009 (E)

Table 2 — Breathing resistance

Classification	Maximum permitted resistance (mbar)		
	inhalation		exhalation
	30 l/min	95 l/min	160 l/min
FFP1	0,6	2,1	3,0
FFP2	0,7	2,4	3,0
FFP3	1,0	3,0	3,0

4.5.4 Elaborazioni:

Al fine di calcolare il flusso del sistema utilizzato è stata applicata la seguente formula:

$$Q = A \cdot v$$

Q → portata [m³/s]

A → Area del tubo in PVC [m²]

$$A = \frac{1}{4} \pi d^2 \rightarrow \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot (0,1)^2 = 0,00785 \text{ m}^2$$

d → diametro del tubo [m]

v → velocità del flusso determinata calcolando la media di 6 velocità misurate durante i test in assenza di filtro [m/s]

$$Q = 0,00785 \cdot [(0,21 + 0,20 + 0,22 + 0,19 + 0,19 + 0,20) / 6] =$$

$$= 1,583 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s} \rightarrow \mathbf{94,98 \text{ L/min}}$$

Il dato relativo all'inserimento del filtro è stato considerato il tempo t_0 dell'elaborazione, sulla base del quale è stata poi eseguita la normalizzazione dei dati seguenti. I dati ottenuti sono stati convertiti in percentuale. Per inserire il filtro è necessario aprire il sistema e questo provoca l'entrata del particolato che è naturalmente presente in ambiente, inoltre questa fase genera

errori casuali dati dal tempo che l'operatore impiega per completare il tutto, perciò per eliminarli, il primo dato a seguito della normalizzazione non è stato considerato, ed abbiamo calcolato la media percentuale con i tre dati seguenti. Il precedente calcolo permette di determinare la media di particolato che non viene bloccato dal filtro quindi, per calcolare l'efficienza è stata applicata la seguente formula:

$$\eta = 100\% - \text{Media percentuale (\%)}$$

Per ogni categoria di filtri è stata calcolata anche la deviazione standard. I dati del test sono poi stati usati per produrre un grafico con lo scopo di vedere chiaramente l'andamento della prova, oltre a poter confrontare i vari filtri in merito all'efficienza di filtrazione.

4.5.5 Risultati:

Tabella 5: Efficienza (%) calcolata e caduta di pressione misurata durante le prove eseguite

	Filtro	Data di sintesi	Data test	Eff. PM10	Eff. PM2,5	Eff. PM1,0	Caduta di pressione [Pa]
Singolo	13% PLA	3/04/2023	17/04/2023	82%	78%	59%	52
Singolo	PLA + 2,5% MC	15/03/2023	06/04/2023	59%	52%	34%	57
Singolo	PLA + 2,5% MC	15/03/2023	06/04/2023	67%	62%	45%	55
Singolo	12,5% CA	28/03/2023	27/04/2023	52%	46%	23%	55
Doppio	12,5% CA	28/03/2023	27/04/2023	78%	74%	55%	57
Singolo	12,5% CA Test 8	08/05/2023	09/05/2023	89%	86%	70%	60
Sandwich	12,5% CA PLA + 5% MC 12,5% CA	28/03/2023 5/04/2023 28/03/2023	27/04/2023	96%	94%	87%	56
Sandwich	12,5% CA Test 8 PLA + 5% MC 12,5% CA Test 8	8/05/2023 5/04/2023 8/05/2023	09/05/2023	84%	81%	69%	65
Singolo	12,5% CA Test 10	8/05/2023	10/05/2023	69%	64%	51%	60
Singolo	PLA + 5% MC	05/04/2023	10/05/2023	70%	67%	56%	54
Sandwich	12,5% CA Test 10 PLA + 5% MC 12,5% CA Test 9	8/05/2023 5/04/2023 8/05/2023	11/05/2023	96%	96%	90%	55
Singolo	PLA + 5% MC	05/04/2023	11/05/2023	74%	70%	57%	55
Singolo	12,5% CA Test 9	08/05/2023	11/05/2023	70%	65%	50%	52

Tabella 6: Media dell'efficienza di filtrazione

Filtro	PM 10	PM 2,5	PM 0,1
13% PLA	82%	78%	59%
13% PLA + 2,5% MC	63%	57%	40%
13% PLA + 5% MC	72%	69%	57%
12,5% CA	70%	69%	49%
12,5% CA doppio	78%	74%	55%
Sandwich	92%	90%	82%

Tabella 7: Deviazione standard

Filtro	PM 10	PM 2,5	PM 0,1
13% PLA	/	/	/
13% PLA + 2,5% MC	5,66%	7,07%	7,78%
13% PLA + 5% MC	2,83%	2,12%	0,71%
12,5% CA	15,12%	16,36%	19,33%
12,5% CA doppio	/	/	/
Sandwich	6,93%	8,14%	11,36%

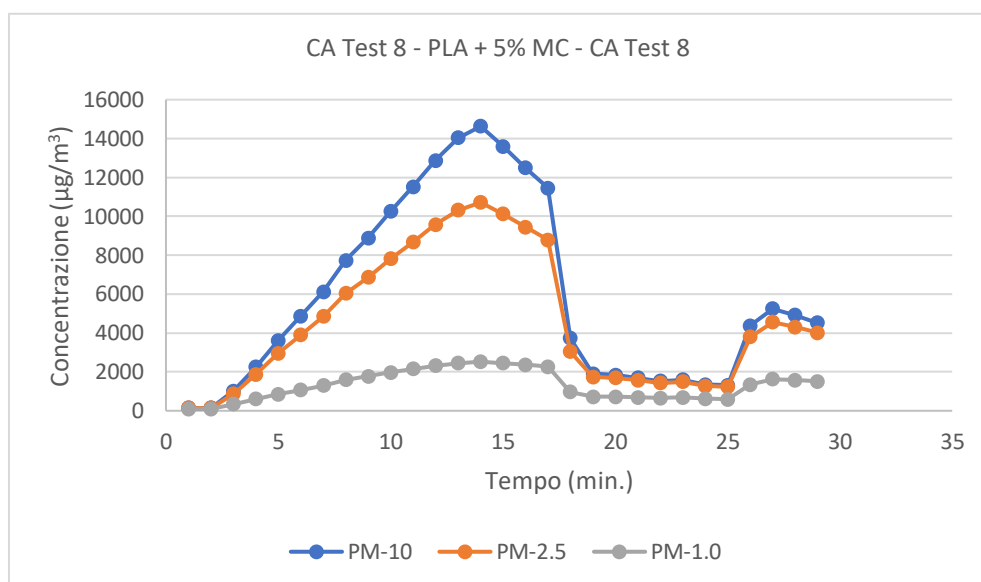


Grafico 1: Esempio grafico ottenuto a seguito di una prova di efficienza di filtrazione

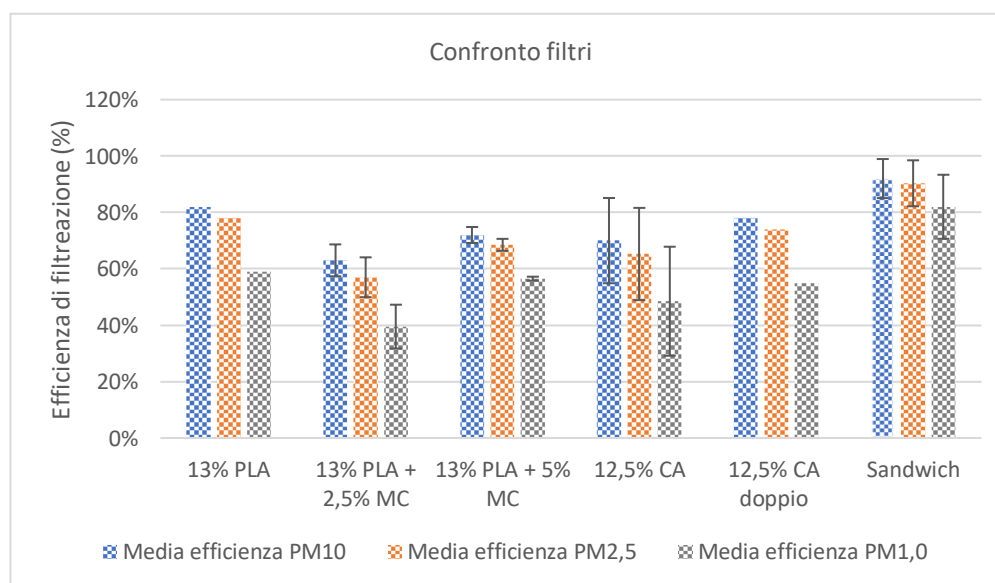
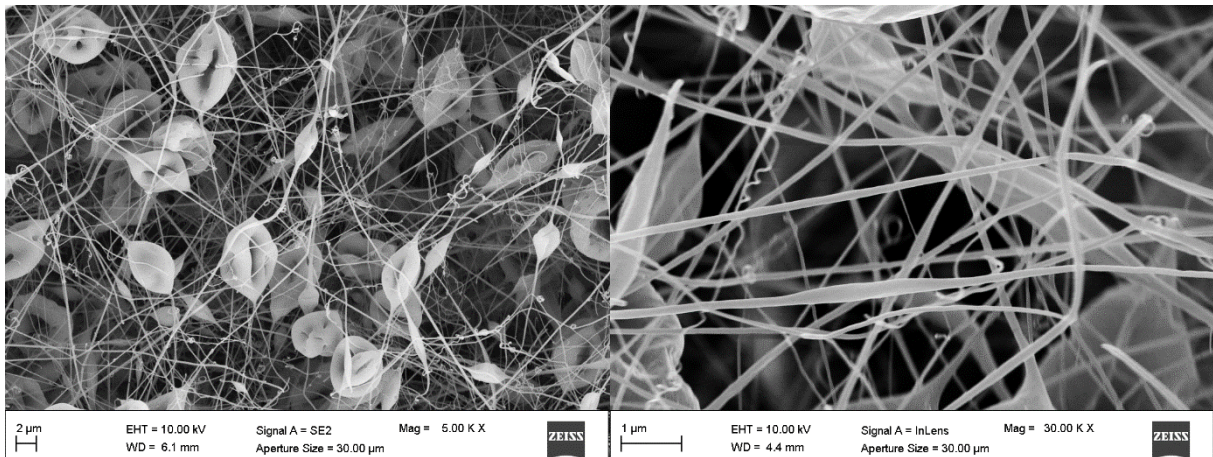
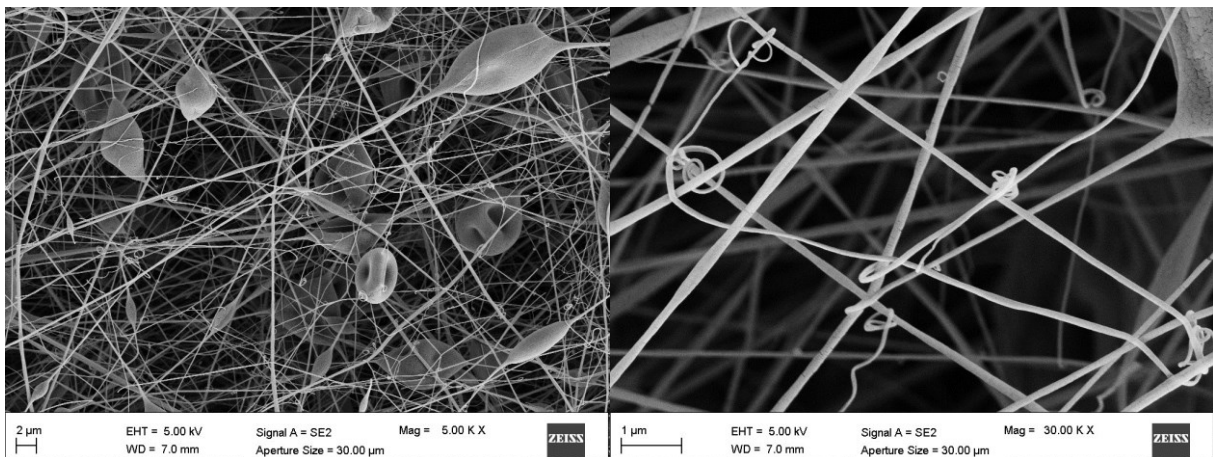


Grafico 2: Confronto dei filtri elettrofilati per efficienza di filtrazione

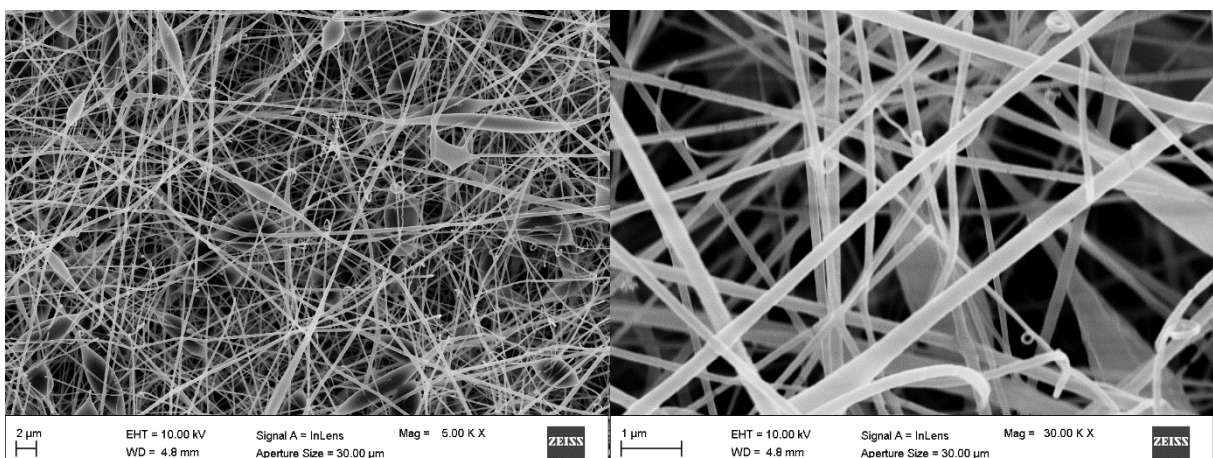
4.6 Osservazione SEM:



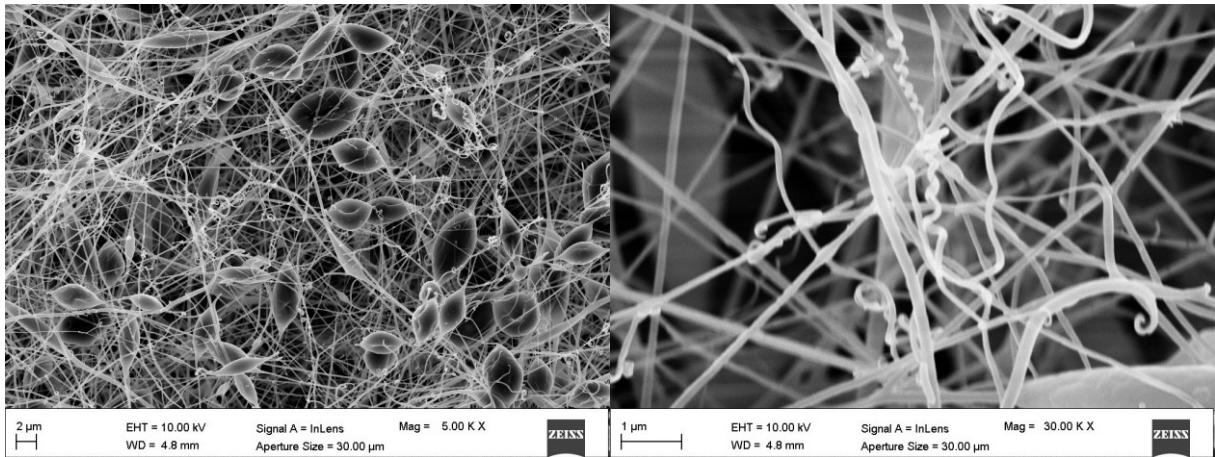
Filtro 1: 13% PLA in acetone 13/03/2023



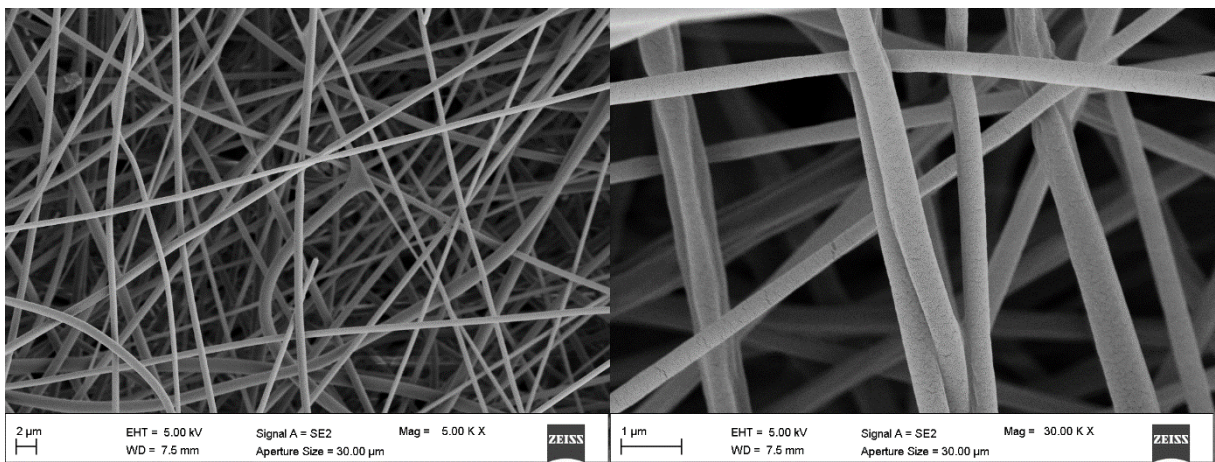
Filtro 2: 13% PLA in acetone 3/04/2023



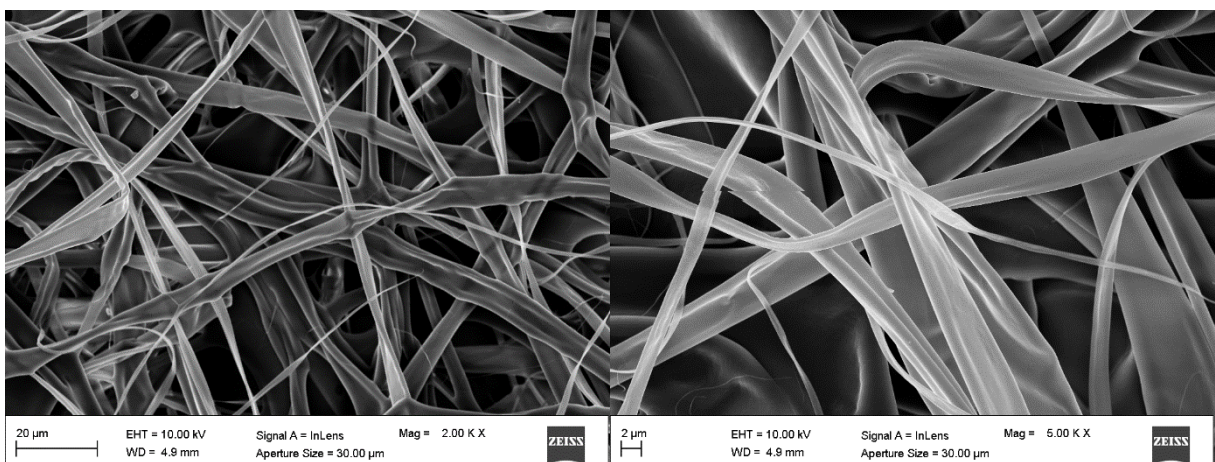
Filtro 3: 13% PLA + 2,5% MC in acetone 15/03/2023



Filtro 4: 13% PLA + 2,5% MC in acetone 17/03/2023

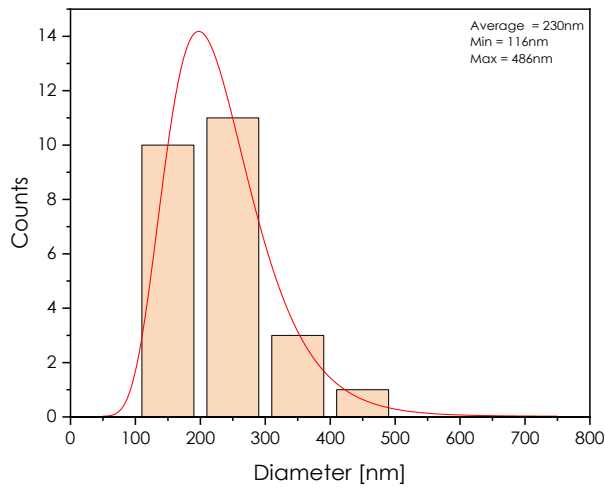


Filtro 5: 13% PLA + 5% MC in acetone 5/04/2023

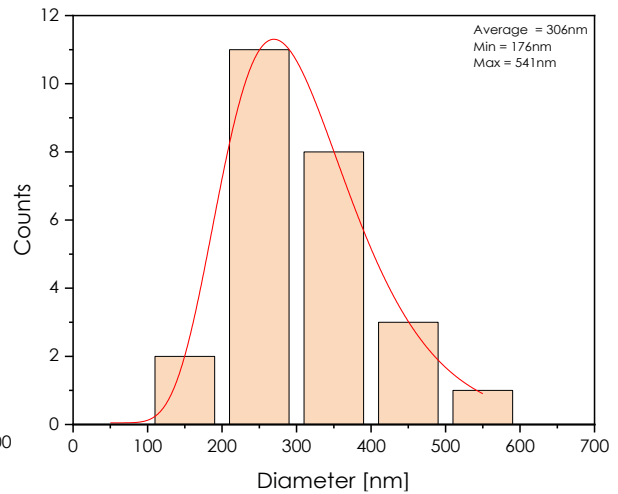


Filtro 6: 12,5% CA in acetone 28/03/2023

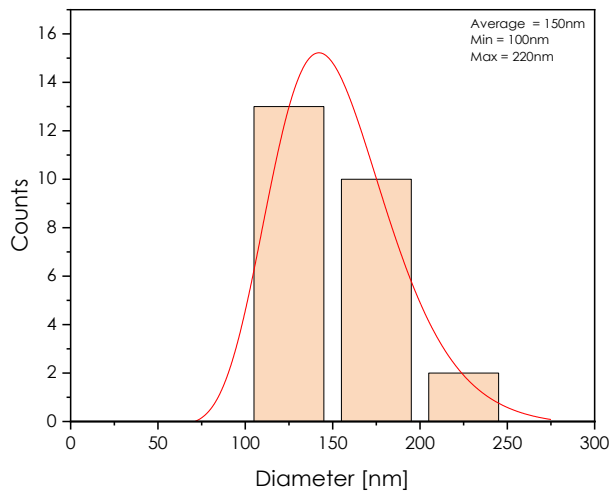
4.7 Distribuzione diametro fibre:



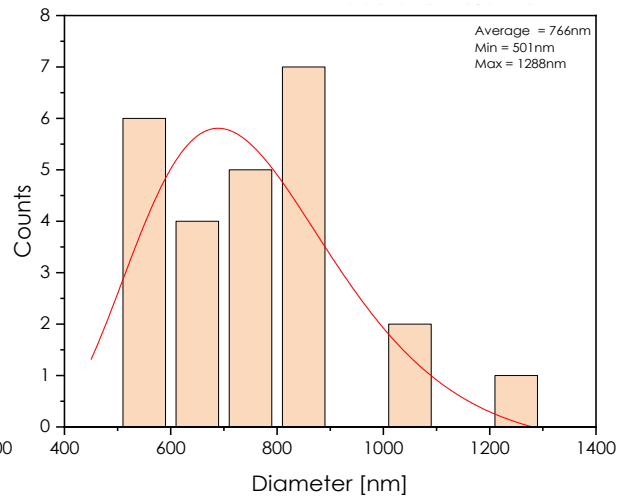
**Grafico 3: 13% PLA (w/V) in acetone
13/03/2023**



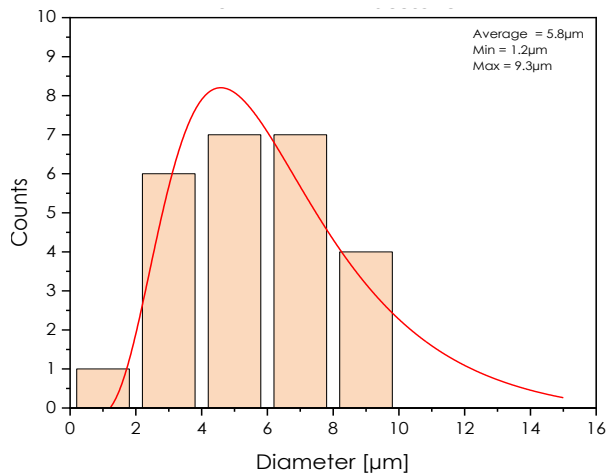
**Grafico 4: 13% (w/V) PLA in acetone +
2,5% MC 15/03/2023**



**Grafico 5: 13% (w/V) PLA in acetone +
2,5% MC 17/03/2023**



**Grafico 6: 13% (w/V) PLA in acetone +
5% MC 5/04/2023**



**Grafico 7: 12,5% (w/V) CA in acetone
28/03/2023**

4.8 Discussione risultati:

Il filtro prodotto con la soluzione di solo PLA è stato testato una sola volta perciò il dato ottenuto non può darci molte informazioni mancando di repliche. Correlando comunque le immagini ottenute al SEM coi dati relativi all'efficienza si può facilmente capire il risultato ottenuto. Le fibre (**Filtro 1**) si presentano disomogenee per quanto riguarda la forma, ed il diametro va da un minimo di 116 nm ad un massimo di 486 nm. Gli elementi che saltano all'occhio sono sicuramente gli accumuli di polimero, che avranno rivestito un ruolo nell'efficienza del filtro e nella caduta di pressione, dato che gli spazi tra le fibre sono ridotti da queste imperfezioni. Osservando l'immagine con il maggior ingrandimento, si può vedere che diverse fibre risultano rotte o attorcigliate, e questa serie di elementi ci fa capire che il filtro è stato creato in condizioni non ottimali. Le immagini acquisite dell'altro filtro prodotto sempre con il solo PLA (**Filtro 2**), mostrano una situazione ancor peggiore perché le differenze tra le fibre sono molte ed evidenti, sia per quanto riguarda la forma sia le dimensioni, oltre a presentare più accumuli e fibre rotte. Nell'immagine con maggior ingrandimento si possono notare delle difformità anche su una stessa fibra, inoltre in alcune appaiono delle crepe e ciò è nuovamente legato alle condizioni di lavoro non ottimali. Entrambi i filtri sono stati prodotti impostando gli stessi parametri, fatta eccezione per quello del 13/03/2023 (**Filtro 1**), per il quale era stato applicato inizialmente un flusso minore, ma dopo pochi minuti, è stato modificato e quella osservata è la faccia dove il cambiamento era già avvenuto, quindi le differenze presenti sono da attribuire alle diverse condizioni ambientali tra T ed Ur.

Passando poi ai filtri prodotti con l'aggiunta al PLA di un 2,5% di MC l'efficienza media per PM 10 e PM 2.5 è attorno al 60%, e del 40% per il PM 0.1. Confrontandolo con altri filtri non risulta particolarmente buona a parità di caduta di pressione (**Tabella 5**). La deviazione standard oscilla poi tra il 6 e l'8% nonostante i due campioni siano stati presi dal medesimo filtro. Le differenze presenti in questo caso sono da attribuire alla forte disomogeneità di spessore del filtro. Le immagini al SEM dimostrano nuovamente come questa tecnica pecchi di riproducibilità date le forti differenze tra i due campioni. Volendo fare un confronto il campione del 15/03/2023 (**Filtro 3, Grafico 4**) è composto da fibre che hanno una maggiore variabilità del diametro a differenza di quello del 17/03/2023 (**Filtro 4, Grafico 5**). In generale si possono osservare le stesse imperfezioni dei filtri precedenti quindi in questo caso l'aggiunta di cellulosa microcristallina non ha aiutato nel processo di elettrofilatura.

La soluzione di PLA + 5% di MC mostra invece un aumento in termini di efficienza ed una caduta di pressione (**Tabella 5**) in linea coi campioni precedenti, inoltre presenta la minor

deviazione standard, ma questo potrebbe essere legato sia al filtro stesso ma anche, come ho già spiegato, all'operatore che in fase di acquisizione del campione avendolo preso nuovamente dallo stesso filtro, è riuscito a prelevare campioni con uno spessore analogo. Le immagini al SEM ([Filtro 5](#)) mostrano un risultato molto interessante, perché a differenza dei precedenti che hanno sempre il PLA come base, non sono presenti imperfezioni rilevanti. Le fibre non presentano grandi differenze in termini di forma, invece il diametro risulta variabile e come si poteva già intuire, osservando le foto tra i filtri prodotti con il PLA, è quello con il diametro medio maggiore ([Grafico 6](#)). Il risultato ottenuto è influenzato sicuramente dall'aggiunta di MC, che viene spesso usata con questo biopolimero per migliorarne le fibre essendo uno strutturante. Nonostante il netto miglioramento però si possono notare ancora delle leggere incrinature sulle fibre, quindi questo dimostra come le condizioni di lavoro debbano essere modificate. Considerando tutto però, mi sento di dire che la parziale perdita di MC durante il processo di creazione del filtro non è un problema così rilevante come pensavo inizialmente. Il filtro ottenuto è perciò un esempio di come si possa ottenere un buon campione anche usando solventi meno tossici.

L'ultima serie di filtri singoli testati è quella del 12,5% CA. Il confronto dei dati, in questo caso, risulta più complesso perché la deviazione standard è particolarmente elevata ([Tabella 7](#)) difatti, analizzando le efficienze dei singoli campioni, si passa per il PM 10 da un minimo attorno al 50% ad un massimo attorno al 90%, e la caduta di pressione è ancora al pari degli altri filtri singoli. Probabilmente le problematiche operative durante il processo produttivo hanno accentuato ancor di più le differenze dei filtri. Osservando le fibre ([Filtro 6](#)) però si può vedere una certa omogeneità per quanto riguarda la forma, che a differenza di tutte le altre appare schiacciata. Guardando invece alle dimensioni si possono vedere delle difformità, che sono perfettamente rappresentate nel grafico soprariportato ([Grafico 7](#)), inoltre il diametro è nell'ordine dei μm e non dei nm a differenza degli altri campioni.

Il [Grafico 2](#) mostra anche una prova fatta con un doppio strato di CA ma anche in questo caso avendo una sola prova non possiamo trarre conclusioni.

L'ultima serie di dati da analizzare appartiene al cosiddetto "sandwich", ovvero una combinazione di CA e PLA. I tre test in cui è stata usata questa sequenza di filtri, mostrano dei livelli di efficienza molto alti in tutte e tre le categorie di particolato. L'aspetto più interessante è che l'elevata efficienza non ha influito negativamente sulla caduta di pressione, perché la massima registrata è pari a 65 Pa, e citando nuovamente la normativa a cui abbiamo fatto

riferimento, il limite massimo raggiungibile è ancora lontano. Il filtro è stato creato con due strati CA che, escludendo l'unico test del 13% di PLA, aveva registrato le medie di efficienza più elevate e come strato centrale il PLA + 5% di MC, che si è rivelato il più efficiente per il PM 0.1. Questa combinazione ha dato origine ad un filtro in grado di bloccare con un'efficienza media del 90% il PM 10 ed il PM 2.5 e fino ad un 82% il PM 0.1. Considerando i dati ottenuti si può dire che questa è sicuramente una combinazione valida perché, pensando anche alle immagini SEM dei singoli filtri, l'acetato di cellulosa con le sue fibre riesce a bloccare facilmente le particelle di maggior diametro, poi la struttura del filtro in PLA lavora sia sulle particelle sfuggite al CA sia su quelle a diametro inferiore, essendo formato da una rete di fibre di diametro e grandezza dei pori minori.

5. Filtri UK

5.1 Strumenti, materiali e procedura di prova

Questa fase dello studio, come detto in precedenza, si è concentrata sul testare i filtri realizzati da un altro gruppo di ricerca. Le serie di filtri su cui lavorare sono cinque e quattro di queste sono state prodotte con materiali e polimeri che, facendo riferimento a quelli già in commercio, vengono spesso usati. Una serie invece è stata fatta con la tecnica dell'electrospinning. A queste serie abbiamo aggiunto anche delle prove con campioni ottenuti da mascherine chirurgiche ed FFP1.

Trattandosi di campioni esterni al dipartimento è ovvio che le informazioni fornite siano limitate quindi, anche le conclusioni che possiamo trarre dai dati ottenuti saranno altrettanto limitate, ed i confronti con articoli che hanno studiato filtri simili diventano difficoltosi.

5.2 Strumenti:

Per testare i seguenti filtri sono stati impiegati i medesimi strumenti presentati nel capitolo precedente.

5.3 Materiali:

Filtri:

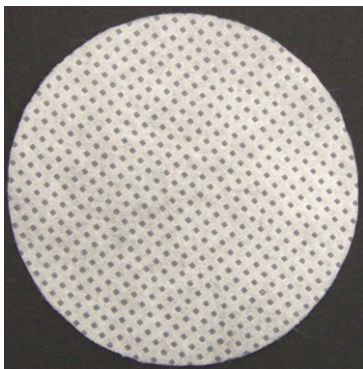


Figura 23: Poplipropilene



Figura 24: Carbone attivo



Figura 25: Electrospun filter

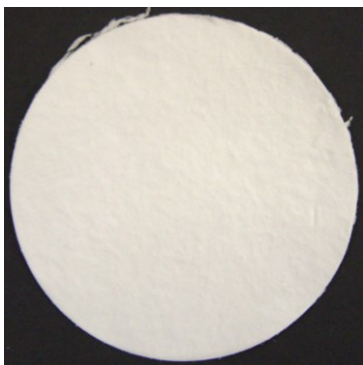


Figura 26: Fibra di vetro A

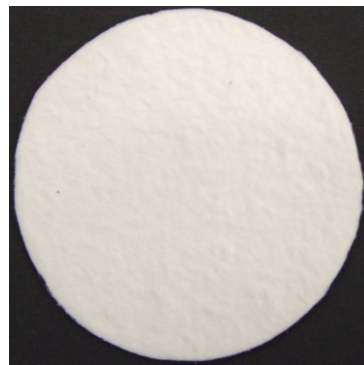


Figura 27: Fibra di vetro B



Figura 28: Mascherina chirurgica



Figura 29: FFP1

5.4 Procedure di prova:

Per questa serie di test sono stati seguiti gli stessi passaggi descritti in precedenza fatta eccezione per le tempistiche dei test perché, dopo aver inserito il filtro abbiamo aspettato per 20' ed una volta tolto sono stati raccolti dati per altri 10' prima di concludere.

5.5 Elaborazioni:

Raccolti i dati per l'ottenimento dell'efficienza di filtrazione la loro trattazione ed elaborazione è analoga al capitolo precedente.

Tabella 8: References per i filtri del gruppo di ricerca (nella tabella sono riportati solo i dati relativi ai polimeri/materiali presenti anche nei campioni testati perciò eventuali trattamenti dei filtri sono stati omissi)

N°	Materiale	Caratterizzazione	Metodo di preparazione	Fonte di particolato	Velocità flusso [cm/s]	Eff. (%)	Ref.
1	Polipropilene -N95 face-piece respirator 8210 Plus®	/	Melt-blown non-woven PP Il diametro medio delle fibre è pari a 2.9 µm e lo spessore del filtro è di 1.53 mm	NaCl (10 – 750 nm)	5 10 15	~97	Tu-Ngoc Lam, Quantum Beam Sci. 2019, 3, 20
2	Polipropilene	/	PP Melt-blown non-woven	Incenso	14.1	Solo il PP PM2.5 82,1 PM10 96,1	Zijian Dai, Adv. Funct. Mater. 2020, 30, 2001488
3	Polipropilene	/	Non-woven PP fabric Microfibre con diametro compreso tra 2 e 15 µm e lunghi qualche millimetro	Incenso PM < 2 µm	/	Solo il PP 91	Thi, Hong Phuong Nguyen, et al. Waste and Biomass Valorization 14.2 (2023): 479-486.

4	Carbone attivo	/	Filtro di 50 mm di diametro, 2.94 mm di spessore e fibre con diametro compreso tra 8 – 10 µm	0.01 g/ml NaCl 20 – 300 nm	6.21	Eff. più bassa registrata 75.66 (269.0 nm)	S. Yang et al. / Building and Environment 125 (2017) 60-66
5	Carbone attivo	roll-to-roll laser-assisted melt-blown spinning (LAMBS) process	Diametro medio di 1,2 µm	2wt % NaCl	4,1 5,3 10,8 14,2 14,9	~97% PM0.3	Wang, Haiyang, et al./ Advanced Fiber Materials (2023): 1-15.
6	Fibra di vetro	/	Diametro fibre 0.5 ± 0,1 µm Spessore 0.4 ± 0,05 mm	NaCl	5 10 25	≥ 99.95 (0.3 µm) a 5 cm/s	D.-Q. Chang et al. Separation and Purification Technology 212 (2019) 699–708
7	Fibra di vetro	Flame blowing fiber felt al fine di produrre 5 campioni	Diametro medio fibre (µm) G1 1,680 G2 1,157 G3 1,014 G4 0,913 G5 0,644	0,97 – 176 µm	Tra 1.75 e 14	4 µm G1 86,40 G2 96 G3 100 G4 100 G5 100	Chi Zou, Journal of Industrial Textiles 5 1.1_suppl (2022): 1186S-1206S
8	Fibra di vetro	Filter A Filter B Fatti con differenti % di Chopped glass fiber e Glass microfiber preparati con wet-laid method	/	NaCl 2%	5.3	/	Min Tang, Journal of Engineering Fibers and Fabrics Volume 11, Issue 4 – 2016

La [Tabella 8](#) presenta una serie di articoli che avevano lo scopo di determinare l'efficienza di filtrazione per filtri prodotti con materiali analoghi ai nostri campioni. Gli elaborati mostrano la varietà di filtri che si può ottenere usando lo stesso materiale di partenza grazie alle differenti tecniche impiegate. Osservando i dati vediamo anche le differenze nei parametri applicati perché, se da un lato la fonte di particolato usata spesso è una soluzione di NaCl, come nel nostro caso, dall'altro il flusso d'aria imposto varia molto. La differenza nel flusso d'aria è legata agli obiettivi che gli studi si sono posti, e di conseguenza alle normative a cui hanno fatto

riferimento o ai futuri possibili impieghi. I filtri in fibre di vetro, ad esempio, vengono spesso impiegati nei filtri High Efficiency Particulate Air filter (HEPA), quindi ipotizzando un'applicazione del genere, il flusso d'aria viene impostato di conseguenza. Confrontare i dati da noi ottenuti con quelli riportati in tabella non è possibile date le discrepanze legate ai metodi di testing impiegati inoltre, l'ostacolo più grande rimane senza dubbio la non conoscenza della tecnica usata per produrre i campioni.

5.6 Risultati:

Tabella 9: Polipropilene

Filtro	Eff. PM2	Eff. PM10	Caduta di pressione [Pa]
1	64%	67%	15
2	56%	57%	23
3	48%	51%	18
5	61%	63%	34
5	62%	64%	29

Tabella 10: FFP1

Filtro	Eff. PM2	Eff. PM10	Caduta di pressione [Pa]
Test 1	88%	88%	50
Test 2	90%	91%	50
Test 3	74%	75%	48
Test 4	82%	83%	49
Test 5	59%	65%	44

Tabella 11: Mascherina chirurgica

Filtro	Eff. PM2	Eff. PM10	Caduta di pressione [Pa]
Test 1	70%	70%	49
Test 2	52%	53%	33
Test 3	64%	65%	38
Test 4	51%	56%	37

Tabella 12: Carbone attivo

Filtro	Eff. PM2	Eff. PM10	Caduta di pressione [Pa]
1	38%	41%	18
1	36%	40%	15
2	39%	43%	17
3	30%	33%	9
4	10%	12%	12
4	30%	32%	12

Tabella 13: Electrospun filter

Filtro	Eff. PM2	Eff. PM10	Caduta di pressione [Pa]
1	52%	55%	45
1	39%	40%	39
3	92%	93%	48
5	97%	97%	48
7	92%	92%	55

Tabella 14: Fibra di vetro

Filtro	Eff. PM2	Eff. PM10	Caduta di pressione [Pa]
1A	61%	63%	42
2A	68%	69%	42
3A	51%	52%	47
4A	75%	76%	39
1B	39%	41%	41
1B	56%	58%	47
2B	39%	40%	42
3B	44%	45%	35
4B	42%	43%	35

Tabella 15: Media dell'efficienza di filtrazione

Filtro	PM2	PM10
Polipropilene	57%	59%
FFP1	79%	80%
Mascherina chirurgica	59%	61%
Carbone attivo	31%	34%
Electrospun filter	81%	82%
Fibra di vetro A	64%	65%
Fibra di vetro A	43%	44%

Tabella 16: Deviazione standard

Filtro	PM2	PM10
Polipropilene	6,42 %	6,39 %
FFP1	13,00 %	10,53 %
Mascherina chirurgica	9,29 %	7,87 %
Carbone attivo	8,58 %	9,33 %
Electrospun filter	24,45 %	23,60 %
Fibra di vetro A	10,24 %	10,17 %
Fibra di vetro A	3,77 %	3,77 %

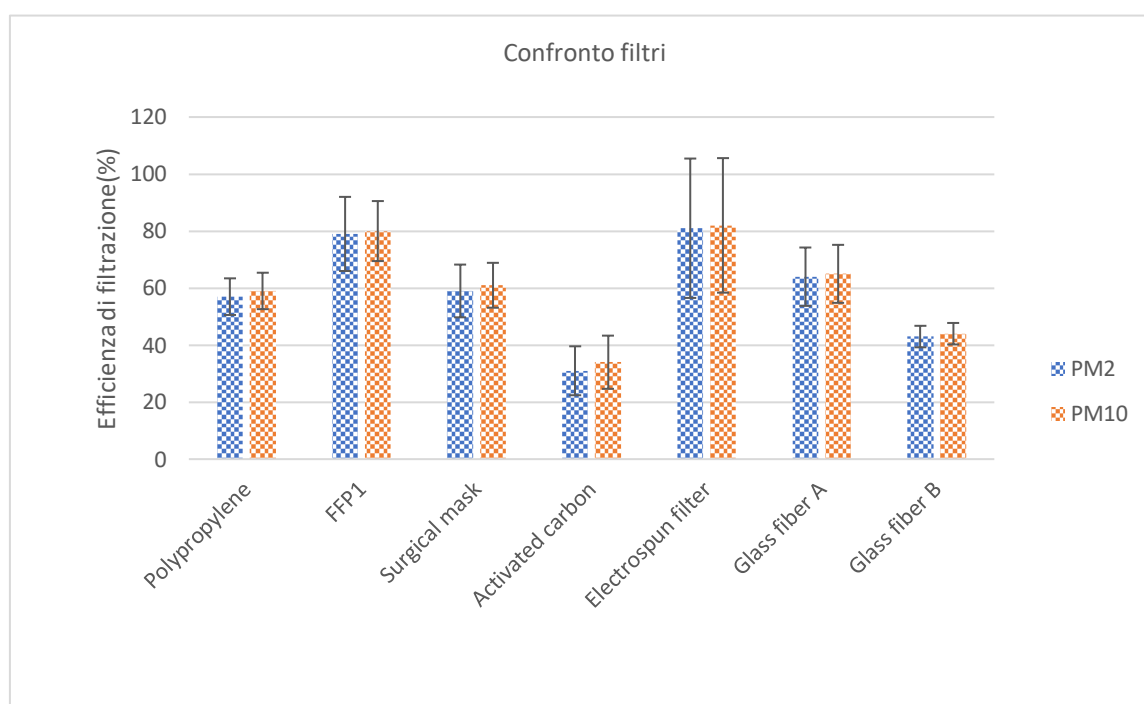
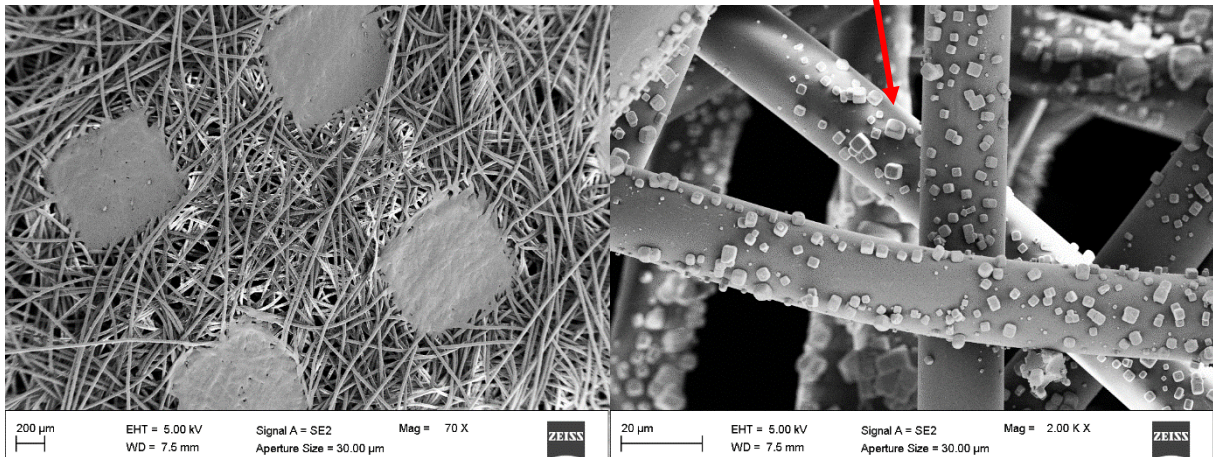


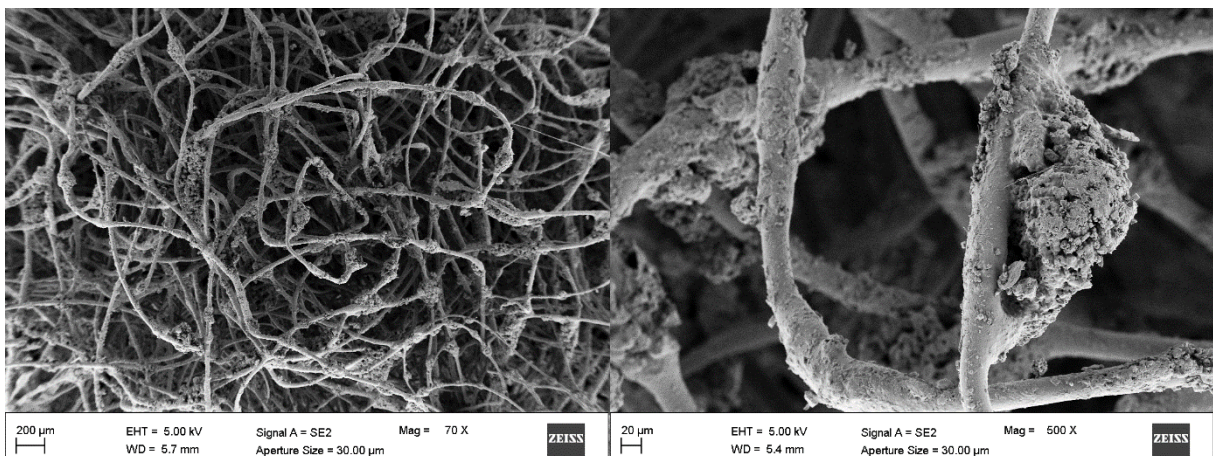
Grafico 8: Confronto dei filtri del gruppo di ricerca per efficienza di filtrazione

5.7 Osservazione SEM:

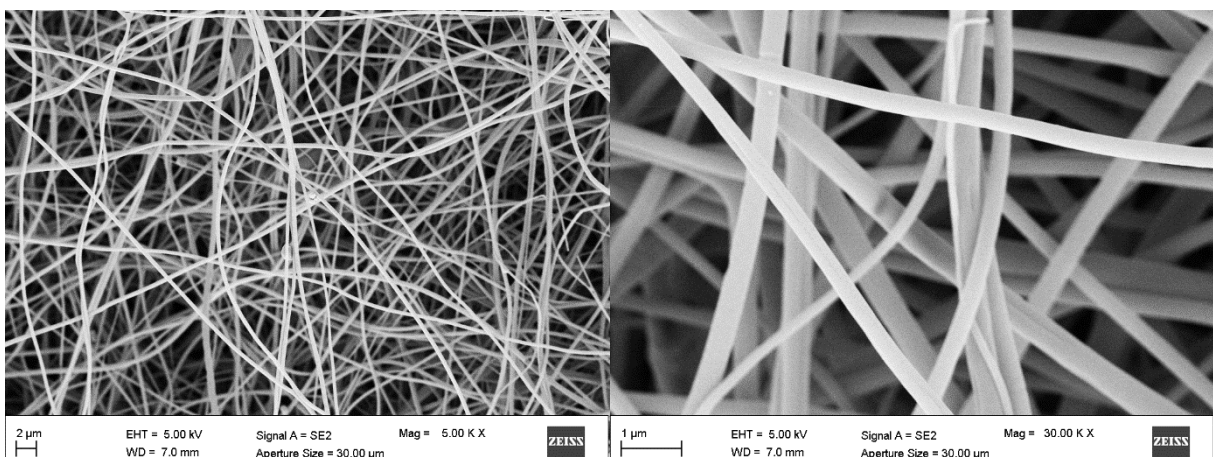
Cristalli di sale



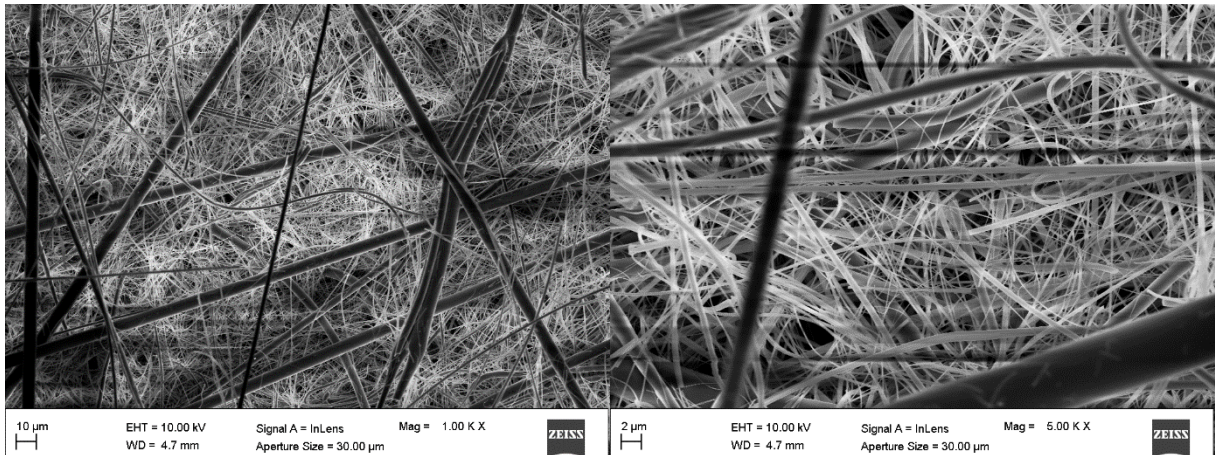
Filtro 7: Polipropilene



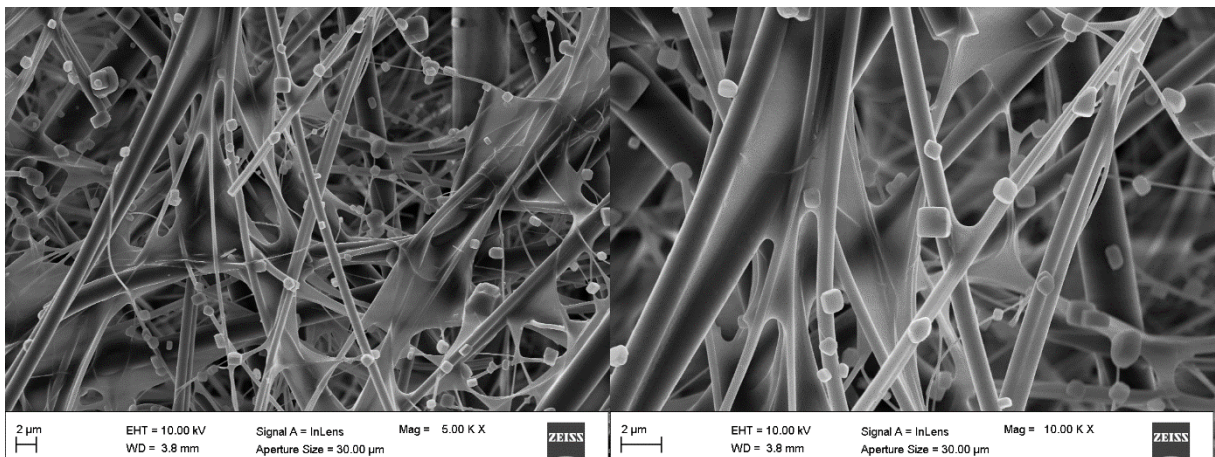
Filtro 8: Carbone attivo



Filtro 9: Electrospun filter



Filtro 10: Fibra di vetro A



Filtro 11: Fibra di vetro B

5.8 Distribuzione diametro fibre:

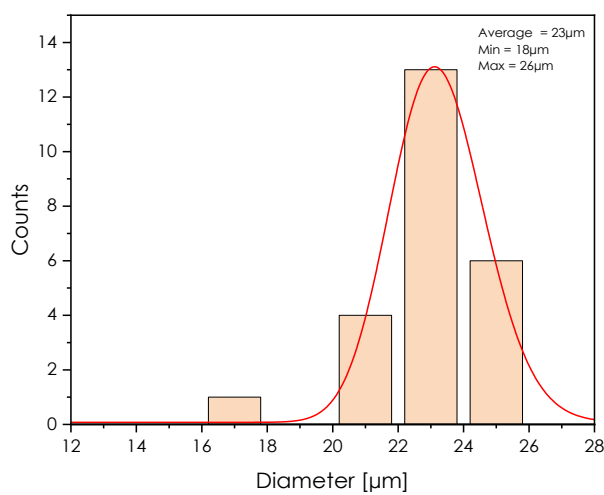


Grafico 9: Polipropilene

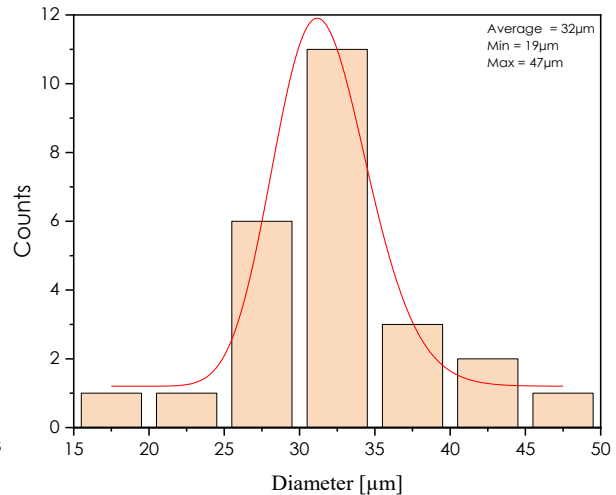


Grafico 10: Carbone attivo

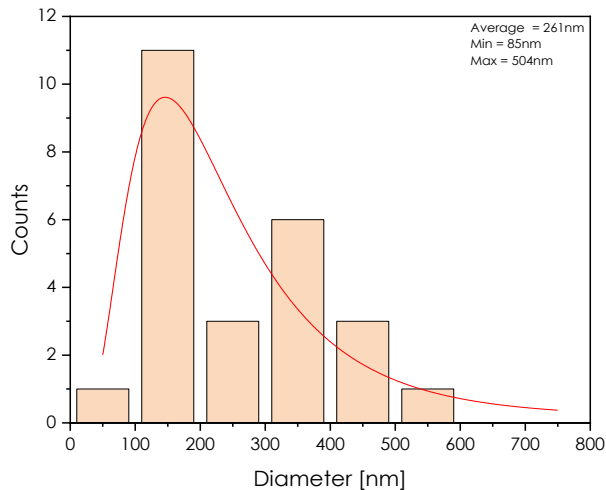


Grafico 11: Electrospun filter

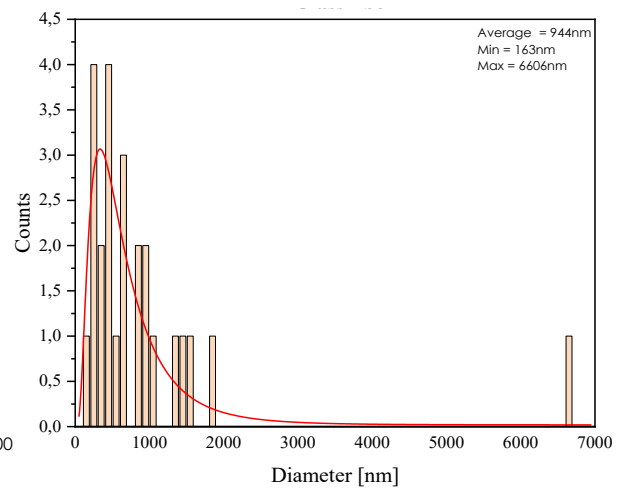


Grafico 12: Fibra di vetro A

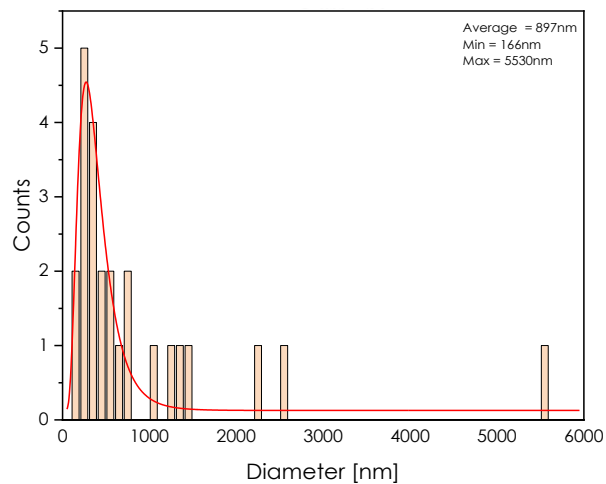


Grafico 13: Fibra di vetro B

5.9 Discussione risultati:

La prima serie di filtri di cui discuteremo è quella del polipropilene. Guardando le immagini SEM (Filtro 7) si possono vedere delle fibre omogenee senza imperfezioni o differenze considerevoli in termini di forma e dimensioni (Grafico 9). L'aspetto interessante è legato alle strutture interposte tra le fibre che rendono la trama del filtro simile ad una rete, come si può vedere anche ad occhio nudo (Figura 23). Questa serie ha registrato un'efficienza media del 60% e la caduta di pressione misurata non è particolarmente alta (Tabella 9). Questo risultato è da attribuire, probabilmente, alla minore superficie filtrante legata alla forma del filtro. Un altro aspetto da considerare è la deviazione standard dalla quale è possibile dedurre che il processo produttivo usato ha una buona ripetibilità (Tabella 16).

I test eseguiti su mascherine certificate quali FFP1 e chirurgiche, non riflettono in modo fedele le loro capacità e questo si può vedere chiaramente dalla deviazione standard (Tabella 16) che

risulta particolarmente elevata nonostante le mascherine siano effettivamente uguali ma, c'è un motivo se questi sono i risultati ottenuti. Partendo dal presupposto che questi test sono stati fatti solo come confronto tra materiale certificato e non, i test purtroppo non hanno mostrato i dati che ci aspettavamo e questo è legato all'acquisizione del filtro. I campioni sono stati ottenuti semplicemente ritagliando le mascherine ma entrambe sono composte da strati, e se nel caso della mascherina chirurgica risulta più semplice ritagliare la porzione di filtro necessaria, nel caso della FFP1 ci sono state non poche difficoltà perché lo strato di materiale più esterno ha una certa rigidità quindi, acquisire il campione ed adattare ciò che si è ottenuto al supporto usato si è rivelato complesso. Il sistema usato per eseguire i test non è quindi idoneo per questa tipologia di campioni.

La serie successiva è a base di carbone attivo ovvero la serie che ha registrato l'efficienza media più bassa essendo attorno al 30% (Tabella 15). Il carbone attivo è notoriamente impiegato per l'adsorbimento di vari composti e non per contrastare il particolato. La sua struttura è profondamente diversa dagli altri campioni (Filtro 8) dato che le fibre sono molto disomogenee ed osservandolo ad occhio nudo (Figura 24), si può vedere quanto spazio c'è tra una fibra e l'altra. Queste sue caratteristiche spiegano perfettamente i dati ottenuti. Finora ho parlato di questi risultati solo in maniera negativa però, se associassimo questa tipologia di filtri con altri più performanti per quanto riguarda il particolato, otterremmo un filtro che non solo è efficiente nei suoi confronti, dato che in parte anche il carbone attivo partecipa alla sua cattura, ma chiaramente sarebbe ottimo per legare e quindi bloccare le specie che è in grado di adsorbire.

I filtri elettrofilati dimostrano nuovamente le loro capacità e criticità perché, guardando solo l'efficienza media è stato raggiunto l'80% ma, al contempo la deviazione standard ha oltrepassato il 20% infatti per questi campioni è fondamentale visionare le efficienze ottenute dai singoli filtri. I campioni testati sono in totale 4 e di questi ben 3 hanno superato il 90% di efficienza, infatti, l'unico a non aver raggiunto risultati simili è il primo. Il primo test effettuato ha mostrato un'efficienza superiore al 40% (Tabella 13) e confrontandola con gli altri è chiaramente inferiore. Si è perciò optato per una replica ma il risultato non è cambiato di molto perché l'aumento registrato, è legato in larga parte al parziale intasamento del filtro per il test precedentemente eseguito. La differenza registrata è stata probabilmente causata da problemi durante il processo di elettrofilatura, che si sono tradotti in difformità tra i campioni. Le immagini SEM (Filtro 9) mostrano poi delle fibre pressoché perfette con una certa variabilità in termini di diametro, (Grafico 11) che formano comunque una fitta trama che giustifica l'alta efficienza.

L'ultima categoria da analizzare è quella dei filtri composti da fibre di vetro suddivise a loro volta in due categorie A e B. In termini di efficienza, c'è una forte differenza tra i due perché, il tipo A ha raggiunto il 60% mentre B il 40% come la caduta di pressione che risulta poco più bassa rispetto al tipo A (Tabella 14). Osservando ad occhio nudo i due filtri l'unica cosa che si può notare è uno spessore maggiore per la tipologia B rispetto al tipo A. Le immagini al SEM hanno invece mostrato una profonda differenza tra i due. La tipologia A (Filtro 10) sembra divisa in livelli, difatti in profondità si vedono delle fibre di diametro inferiore, che creano una fitta rete al di sopra delle quali sono invece presenti delle fibre di dimensione decisamente maggiore. Questo appare chiaro visionando le misure dei diametri in quanto si passa da un minimo di 163 nm ad un massimo di 6606 nm. La tipologia B (Filtro 11) invece cambia totalmente perché, fibre cilindriche si mescolano a strutture in vetro fortemente disomogenee, difatti anche in questo caso il range dei diametri delle fibre è molto ampio. L'ultimo appunto è legato alla deviazione standard che dimostra una maggiore omogeneità tra i filtri della tipologia B rispetto a quelli della tipologia A (Tabella 16).

Tabella 17: Dati ottenuti dall'analisi EDS del campione del filtro Fibra di vetro B

Spectrum: Acquisition

Element	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error (1 Sigma) [wt.%]
Sodium	K-series	13.32	18.47	14.34	0.87
Chlorine	K-series	10.47	14.52	7.31	0.39
Oxygen	K-series	24.28	33.69	37.59	3.54
Carbon	K-series	16.70	23.17	34.44	3.28
Silicon	K-series	6.07	8.42	5.35	0.29
Aluminium	K-series	0.63	0.88	0.58	0.07
Potassium	K-series	0.38	0.53	0.24	0.05
Calcium	K-series	0.23	0.31	0.14	0.04
Total:		72.08	100.00	100.00	

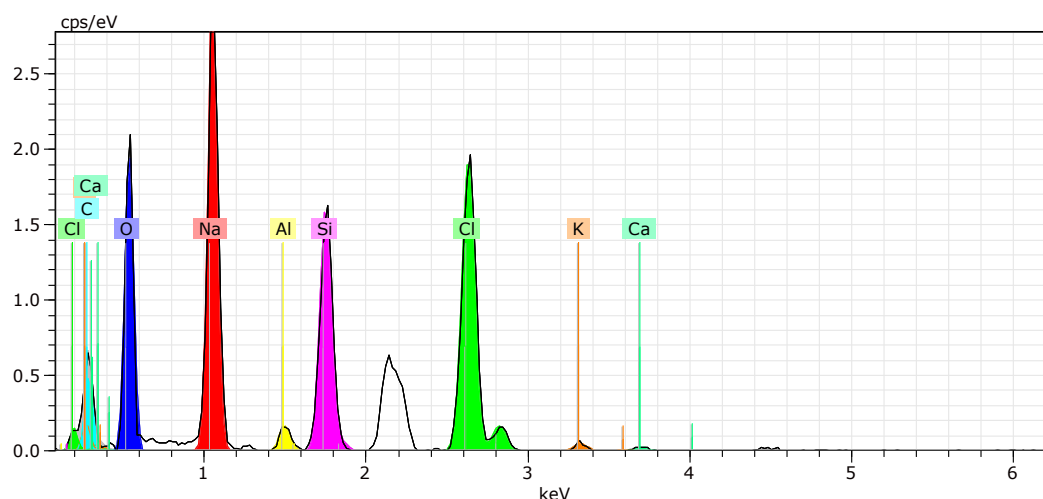


Grafico 14: Rappresentazione grafica dell'analisi EDS

La [Tabella 17](#) ed il [Grafico 14](#) sono il risultato di un'analisi qualitativa EDS ovvero Energy Dispersive Spectroscopy eseguita sul campione in fibra di vetro B. Questo tipo di analisi viene effettuata dal SEM difatti si sfrutta nuovamente il fascio di elettroni, ma si imposta una maggiore potenza. Il rivelatore impiegato è l'ECON I che permette di identificare gli elementi chimici che compongono il campione. L'analisi può essere effettuata sia su un'area, sia su un punto specifico del campione, come in questo caso, dato che abbiamo deciso di concentrarci sui cristalli presenti in alcuni filtri per avere la certezza che si trattasse del sale bloccato durante le prove eseguite.

6. Considerazioni finali:

Questo studio ha messo a confronto due macrocategorie di filtri, ovvero quelli prodotti con materiali tipicamente impiegati in questo settore, e quelli elettrofilati a base di biopolimeri.

Confrontando i dati appare chiara l'efficacia dei filtri prodotti con questa tecnica dimostrando così, ancora una volta, le sue potenzialità. La ricerca condotta ha mostrato sia i suoi punti forti che i punti deboli. Da un lato abbiamo degli ottimi risultati dall'altro però, ci scontriamo con bassa riproducibilità e forte dipendenza dalle condizioni ambientali. I vantaggi che potremmo trarre producendo filtri con queste caratteristiche e composizione è innegabile, ma sarà fondamentale potenziare e migliorare il processo produttivo, impiegando anche polimeri differenti, aggiungendo additivi nonché modificando il solvente.

Parlando proprio del solvente, durante questa ricerca, non siamo riusciti ad utilizzare la soluzione in cui erano presenti sia l'acetone che l'acqua. Futuri studi dovrebbero ripartire proprio da lì con la speranza che il solvente organico venga ridotto il più possibile sia per l'ambiente che per i consumatori.

Nell'elaborato ho accennato anche ai possibili effetti sul corpo umano legati alla natura e produzione dei campioni quindi, ancor prima di valutare le possibili applicazioni di questi prodotti, penso che sia fondamentale determinare con certezza che siano sicuri. Chiarito questo punto, volendo comunque ipotizzare settori in cui applicare questi prodotti, non possiamo non pensare alle mascherine.

Per eseguire i test abbiamo preso come esempio la normativa sopracitata, però quest'ultima prevede diversi test e differenti modalità di esecuzione degli stessi, quindi per verificare se effettivamente questa strada sia percorribile c'è ancora molto lavoro da fare, ma mi sento di dare una possibilità a questa opzione.

Sono presenti studi che hanno già iniziato ad applicare filtri di questa tipologia per il miglioramento della qualità dell'aria indoor, perciò sarebbe interessante vedere come i filtri già prodotti rispondono in condizioni di lavoro differenti come per sistemi Heating Ventilation Air Conditioning (HVAC) o filtri HEPA.

Un altro aspetto che trovo interessante, ma non molto considerato finora, è lo smaltimento dei filtri che dipenderà interamente dal loro impiego. Pensando a filtri usati in ambito ospedaliero, la problematica principale è sicuramente quella biologica, perciò sarà necessario identificare un

percorso specifico che differirà, ad esempio, da quello studiato per filtri destinati all'ambito civile che trattano aria ambiente.

Per concludere, rivolgendo lo sguardo al futuro, non so se questa tecnologia ed i materiali da essa prodotti prenderanno piede come quelli già consolidati nel tempo, ma non ho dubbi nel dire che c'è ancora un ampio margine di crescita che potrebbe aumentarne la popolarità e l'utilizzo tanto da renderli di uso comune.

Bibliografia:

1. Istituto Superiore di Sanità Strategie di monitoraggio del materiale particolato PM10 e PM2,5 in ambiente indoor. Caratterizzazione dei microinquinanti organici e inorganici. Gaetano Settimo, Loredana Musmeci, Annalisa Marzocca, Angelo Cecinato, Giorgio Cattani, Sergio Fuselli, per il Gruppo di Studio Nazionale sull'Inquinamento Indoor 2016, vi, 34 p. Rapporti ISTISAN 16/16 ISSN: 1123-3117 (cartaceo) • 2384-8936 (online).
2. <https://simc.arpae.it/ctn/lineeguida/annesso%203.pdf> 14-09-2023
3. Harrison RM, Yin J. Particulate matter in the atmosphere: which particle properties are important for its effects on health? *Science of The Total Environment*. aprile 2000;249(1-3):85-101.
4. Li Z, Wen Q, Zhang R. Sources, health effects and control strategies of indoor fine particulate matter (PM2.5): A review. *Science of The Total Environment*. maggio 2017;586:610-22.
5. Comunian S, Dongo D, Milani C, Palestini P. Air Pollution and COVID-19: The Role of Particulate Matter in the Spread and Increase of COVID-19's Morbidity and Mortality. *IJERPH*. 22 giugno 2020;17(12):4487.
6. Ozkaynak H, Xue J, Spengler J, Wallace L, Jenkins P. PERSONAL EXPOSURE TO AIRBORNE PARTICLES AND METALS : RESULTS FROM THE PARTICLE TEAM STUDY IN RIVERSIDE, CALIFORNIA.
7. <https://www.nationalgeographic.com/history/article/great-smog-of-london-1952-coal-air-pollution-environmental-disaster>. 20-08-2023
8. https://www.salute.gov.it/imgs/C_17_opuscoliPoster_283_ulterioriallegati_ulterioreallegato_7_alleg.pdf. 20-08-2023
9. <https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2022/health-impacts-of-air-pollution#:~:text=Exposure%20to%20concentrations%20of%20fine,ozone%20caused%2024%2C000%20premature%20deaths> link UE 20-08-2023.
10. Panyacosit L. A Review of Particulate Matter and Health: Focus on Developing Countries. *SSRN Journal* [Internet]. 2000 [citato 7 settembre 2023]; Disponibile su: <http://www.ssrn.com/abstract=235099>

11. Rajagopalan S, Brauer M, Bhatnagar A, Bhatt DL, Brook JR, Huang W, et al. Personal-Level Protective Actions Against Particulate Matter Air Pollution Exposure: A Scientific Statement From the American Heart Association. *Circulation* [Internet]. 8 dicembre 2020 [citato 7 settembre 2023];142(23). Disponibile su: <https://www.ahajournals.org/doi/10.1161/CIR.0000000000000931>
12. Jiang XQ, Mei XD, Feng D. Air pollution and chronic airway diseases: what should people know and do? *Journal of Thoracic Disease*. 2016;8(1).
13. Amaral S, de Carvalho J, Costa M, Pinheiro C. An Overview of Particulate Matter Measurement Instruments. *Atmosphere*. 9 settembre 2015;6(9):1327–45.
14. https://www.salute.gov.it/portale/temi/p2_6.jsp?lingua=italiano&id=4384&area=indor&menu=vuoto 20-08-2023.
15. Vijayan V, Paramesh H, Salvi S, Dalal AK. Enhancing indoor air quality –The air filter advantage. *Lung India*. 2015;32(5):473.
16. <https://www.epicentro.iss.it/radon/> 20-08-2023.
17. Megahed NA, Ghoneim EM. Indoor Air Quality: Rethinking rules of building design strategies in post-pandemic architecture. *Environmental Research*. febbraio 2021;193:110471.
18. Clausen G. Ventilation filters and indoor air quality: a review of research from the International Centre for Indoor Environment and Energy. *Indoor Air*. agosto 2004;14(s7):202–7.
19. Zhu M, Han J, Wang F, Shao W, Xiong R, Zhang Q, et al. Electrospun Nanofibers Membranes for Effective Air Filtration. *Macromol Mater Eng*. gennaio 2017;302(1):1600353.
20. Russo F, Castro-Muñoz R, Santoro S, Galiano F, Figoli A. A review on electrospun membranes for potential air filtration application. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. ottobre 2022;10(5):108452.
21. <https://www.air-quality-eng.com/air-cleaners/filtration-mechanisms/> 20-08-2023.
22. Xue J, Wu T, Dai Y, Xia Y. Electrospinning and Electrospun Nanofibers: Methods, Materials, and Applications. *Chem Rev*. 24 aprile 2019;119(8):5298–415.
23. <https://www.microscopiaelettronica.dabanco.it/preparazione-del-campione-come-la-metallizzazione-aiuta-ad-ottenere-immagini-sem> 10-03-2023.
24. Singhvi M, Gokhale D. Biomass to biodegradable polymer (PLA). *RSC Adv*. 2013;3(33):13558.
25. Taib NAAB, Rahman MR, Huda D, Kuok KK, Hamdan S, Bakri MKB, et al. A review on poly lactic acid (PLA) as a biodegradable polymer. *Polym Bull*. febbraio 2023;80(2):1179–213.

26. Vatanpour V, Pasaoglu ME, Barzegar H, Teber OO, Kaya R, Bastug M, et al. Cellulose acetate in fabrication of polymeric membranes: A review. *Chemosphere*. maggio 2022;295:133914.
27. Trache D, Hussin MH, Hui Chuin CT, Sabar S, Fazita MRN, Taiwo OFA, et al. Microcrystalline cellulose: Isolation, characterization and bio-composites application—A review. *International Journal of Biological Macromolecules*. dicembre 2016;93:789–804.
28. Wang W, Chen T, Li Z, Tan Q, Meng Z, Qiu H, et al. Comparison of filtration efficiency and respiratory resistance of COVID-19 protective masks by multi-national standards. *American Journal of Infection Control*. maggio 2022;50(5):516–24.

Bibliografia immagini:

Figura 1:

https://www.epa.gov/sites/default/files/2016-09/pm2.5_scale_graphic-color_2.jpg 20-08-2023

Figura 2:

https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/b/b7/Particulate_danger-it.svg/1200px-Particulate_danger-it.svg.png 20-08-2023

Figura 3:

https://journals.sagepub.com/cms/10.1177/1528083720980169/asset/images/large/10.1177_1528083720980169-fig2.jpeg 20-08-2023

Figura 4:

<https://www.researchgate.net/profile/Michael-Nalbandian/publication/275643150/figure/fig5/AS:669546050514950@1536643626116/9-Schematic-of-electrospinning-process.png> 20-08-2023

Immagine mascherina chirurgica:

<https://www.bcforniture.it/media/catalog/product/cache/1/image/9df78eab33525d08d6e5fb8d27136e95/9/5/952001.jpg> 20-08-2023

Immagine mascherina FFP1:

<https://www.lineonline.it/media/catalog/product/cache/334acbbd1a110ffec9e6e633902054ed/m/a/mascherina-monouso-3m-classic-8710-ffp1-nr-d-7000034734-immagine-.jpg> 20-08-2023

Monomero 1:

<https://sos3dprinting.com/wp-content/uploads/2018/09/pla-formula.png> 20-08-2023

Monomero 2:

<https://www.thpanorama.com/img/images/acetato-de-celulosa-estructura-quimica-propiedades-y-usos.png> 20-08-2023

Monomero 3:

<https://excipia.eu/wp-content/uploads/2021/01/Cellobiose.png> 20-08-2023

Bibliografia tabelle:

Tabella 1:

https://www.gazzettaufficiale.it/atto/serie_generale/caricaArticolo?art.versione=1&art.idGruppo=0&art.flagTipoArticolo=11&art.codiceRedazionale=010G0177&art.idArticolo=1&art.idSottoArticolo=1&art.idSottoArticolo1=10&art.dataPubblicazioneGazzetta=2010-09-15&art.progressivo=0#art 20-08-2023

Tabella 2:

1. Orlando R, Gao Y, Fojan P, Mo J, Afshari A. Filtration Performance of Ultrathin Electrospun Cellulose Acetate Filters Doped with TiO₂ and Activated Charcoal. *Buildings*. 18 novembre 2021;11(11):557
2. Tsekova PB, Spasova MG, Manolova NE, Markova ND, Rashkov IB. Electrospun curcumin-loaded cellulose acetate/polyvinylpyrrolidone fibrous materials with complex architecture and antibacterial activity. *Materials Science and Engineering: C*. aprile 2017;73:206–14.
3. Chakraborty PK, Adhikari J, Saha P. Facile fabrication of electrospun regenerated cellulose nanofiber scaffold for potential bone-tissue engineering application. *International Journal of Biological Macromolecules*. febbraio 2019;122:644–52
4. Gaitán A, Gacitúa W. Morphological and Mechanical Characterization of Electrospun Polylactic Acid and Microcrystalline Cellulose. *BioResources*. 28 marzo 2018;13(2):3659–73.
5. Casasola R, Thomas NL, Trybala A, Georgiadou S. Electrospun poly lactic acid (PLA) fibres: Effect of different solvent systems on fibre morphology and diameter. *Polymer*. settembre 2014;55(18):4728–37.

Tabella 4:

<https://beseenpromotions.co.uk/wp-content/uploads/2020/04/breathing-resistance.jpg>
20-08-2023

Tabella 8:

1. Lam TN, Wu CH, Huang SH, Ko WC, Huang YL, Ma CY, et al. Multi-Scale Microstructure Investigation for a PM_{2.5} Air-Filter Efficiency Study of Non-Woven Polypropylene. *QuBS*. 28 ottobre 2019;3(4):20.
2. Dai Z, Zhu J, Yan J, Su J, Gao Y, Zhang X, et al. An Advanced Dual-Function MnO₂-Fabric Air Filter Combining Catalytic Oxidation of Formaldehyde and High-Efficiency Fine Particulate Matter Removal. *Adv Funct Materials*. ottobre 2020;30(42):2001488.
3. Thi HPN, Thi KTP, Tran NT, Mai TH, Naqvi SR, Chung WJ, et al. Graphene-Integrated Nonwoven Polypropylene Fabric for Simultaneous Filtering of Particulate Matter and Volatile Organic Compounds. *Waste Biomass Valor*. febbraio 2023;14(2):479–86.
4. Yang S, Zhu Z, Wei F, Yang X. Carbon nanotubes / activated carbon fiber based air filter media for simultaneous removal of particulate matter and ozone. *Building and Environment*. novembre 2017;125:60–6.
5. Wang H, Zu D, Jiang X, Xu Y, Cui Z, Du P, et al. Bifunctional Activated Carbon Ultrathin Fibers: Combining the Removal of VOCs and PM in One Material. *Adv Fiber Mater* [Internet]. 3 agosto 2023 [citato 12 settembre 2023]; Disponibile su: <https://link.springer.com/10.1007/s42765-023-00309-0>
6. Chang DQ, Tien CY, Peng CY, Tang M, Chen SC. Development of composite filters with high efficiency, low pressure drop, and high holding capacity PM_{2.5} filtration. *Separation and Purification Technology*. aprile 2019;212:699–708.
7. Zou C, Shi Y, Qian X. Characterization of glass fiber felt and its performance as an air filtration media. *Journal of Industrial Textiles*. giugno 2022;51(1_suppl):1186S-1206S.
8. Tang M, Liang Y, Hu J. The Impact of Fiber Dispersion on Filtration and Tensile Properties of Glass Fiber Filter Paper. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*. dicembre 2016;11(4):155892501601100.