



**Politecnico  
di Torino**

**Politecnico di Torino**

Laurea magistrale in Ingegneria Meccanica

A.A. 2023/2024

Sessione di Laurea marzo/aprile

# **Studio delle caratteristiche di inserti porosi per cuscinetti ad aria**

Relatori:

Prof. Terenziano Raparelli  
Prof. Andrea Trivella  
Prof. Luigi Lentini  
Prof. Federico Colombo

Candidati:

Alessandro D'Angelo 292859



## Ringraziamenti

Desidero esprimere la mia riconoscenza verso mio padre, mia madre e mio fratello per avermi consentito di sostenere il percorso accademico in fase di conclusione. Non posso non ringraziare per l'opportunità della stesura di questo lavoro di tesi i relatori Prof. Terenziano Raparelli, Prof. Federico Colombo, Prof. Andrea Trivella e Prof. Luigi Lentini. In particolare, a questi ultimi due sono particolarmente grato per la pazienza ed il tempo dedicatomi.

# Abstract

I pattini pneumostatici sono dei componenti meccanici realizzati con lo scopo di soddisfare applicativi tecnologici dove è prevista un'alta precisione di posizionamento, efficienza e basso impatto ambientale. La base di questa tecnologia è l'utilizzo dell'aria come lubrificante. Per eliminare l'attrito tra le parti in movimento viene interposto uno strato d'aria pressurizzata noto come meato. Per controllare la portata d'aria che attraversa il pattino, la distribuzione di pressione all'interno del meato ed evitare fenomeni di instabilità, innumerevole lavoro viene svolto sullo studio del sistema di alimentazione. Ne esistono di varie tipologie con caratteristiche differenti, In questo lavoro di tesi ci si è concentrati sul sistema di alimentazione poroso. Dato che il materiale poroso è costituito da una complessa struttura di passaggi per l'aria, il profilo di pressione ottenibile è piuttosto uniforme. I cuscinetti pneumostatici porosi sono caratterizzati da una alta rigidezza, capacità di carico, capacità di smorzamento e un'alta stabilità pneumatica quando messi a confronto con altri tipi di cuscinetti pneumostatici. La stabilità dell'inserito poroso è dovuta all'effetto di smorzamento nei tortuosi passaggi che l'aria deve seguire prima di arrivare alla superficie di interfaccia. Nonostante i vantaggi parte dei canali di passaggio dell'aria sono chiusi aumentando il volume del meato con il conseguente calo di prestazioni. Esistono delle difficoltà legate alla permeabilità del materiale poroso, che porta a delle problematiche di ripetibilità dei dispositivi. Una permeabilità eccessiva può portare un cuscinetto pneumostatico poroso in condizioni di instabilità. Per i motivi sopracitati è stato deciso di approfondire lo studio sugli inserti porosi in grafite. A tal fine è stato ripristinato un banco già presente in laboratorio, questo è stato utilizzato in passato per studiare il comportamento di materiale poroso in bronzo sinterizzato. Il banco consente di regolare e leggere la pressione di monte e di valle di un inserto poroso. Una volta ottenuti i risultati sperimentali della permeabilità è stata verificata la legge di Darcy e di Forchheimer per l'analisi della portata. Con lo scopo di approfondire ulteriormente le caratteristiche dei cuscinetti pneumostatici porosi, è stato prodotto un banco per eseguire le prove di permeabilità su dei pattini pneumostatici porosi finiti. La scelta è nata con l'obiettivo di testare direttamente varie tecniche di produzione dei pattini oltre ad avere la possibilità di poter effettuare caratterizzazioni statiche, dinamiche e poter eseguire misure sul profilo di pressione del pattino. Sono stati ottenuti dei pattini pneumostatici porosi di cui è stata valutata la permeabilità, purtroppo non è stato possibile eseguire altre misure dato che i pattini costruiti necessitano di una lavorazione di lappatura. In fine, è stato costruito un modello matematico di un pattino pneumostatico poroso circolare. I valori numerici ottenuti sono stati confrontati con i valori sperimentali raccolti su un pattino commerciale NEW WAY S106501. Il modello una volta verificato con i valori sperimentali, ha permesso di essere usato per predire le prestazioni di un pattino poroso costruito con i materiali testati nel banco di permeabilità.

# Indice

|  |     |
|--|-----|
| Ringraziamenti .....                                     | i   |
| Abstract .....   | ii  |
| Indice.....  | iii |
| Capitolo 1.....  | 1   |
| 1.1 Introduzione .....                                   | 1   |
| 1.2 Principio di funzionamento.....                      | 2   |
| Capitolo 2.....  | 11  |
| 2.1 Banco di permeabilità .....                          | 11  |
| 2.2 Strumentazione del banco .....                       | 13  |
| 2.2.1 Trasduttori di pressione .....                     | 13  |
| 2.2.2 Resistenza regolabile.....                         | 15  |
| 2.2.3 Flussimetro .....                                  | 15  |
| 2.3 Costruzione dei provini.....                         | 16  |
| 2.3.1 Porta provino in ottone.....                       | 17  |
| 2.3.2 Porta provino in resina epossidica.....            | 19  |
| 2.4 Procedura esecuzione delle prove permeabilità.....   | 22  |
| 2.5 Modello calcolo della portata teorica.....           | 24  |
| Capitolo 3.....  | 37  |
| 3.1 Banco permeabilità pattini pneumostatici porosi..... | 37  |
| 3.2 Progettazione Pattino pneumostatico poroso .....     | 39  |
| 3.3 Produzione del banco e del pattino .....             | 43  |
| 3.4 Risultati prove di permeabilità.....                 | 45  |
| Capitolo 4.....  | 53  |
| 4.1 Modello pattino pneumostatico poroso.....            | 53  |
| 4.2 Equazione di Reynolds.....                           | 53  |
| 4.3 Discretizzazione alle differenze finite.....         | 57  |
| 4.4 Portata inserto poroso <i>Gin</i> .....              | 59  |
| 4.5 Condizioni al contorno.....                          | 60  |
| 4.6 Identificazione sperimentale permeabilità .....      | 62  |
| 4.7 Verifica del modello.....                            | 63  |

|  |    |
|--|----|
| 4.8 Simulazione inserti grafite .....  | 66 |
| Capitolo 5.....                        | 69 |
| 5.1 conclusione e sviluppi futuri..... | 69 |
| Bibliografia .....                     | 70 |

# Capitolo 1

## 1.1 Introduzione

I cuscinetti ad aria sono dei dispositivi in cui viene utilizzato del gas in pressione come lubrificante, sono impiegati in applicazioni dove sono richieste elevate precisioni di posizionamento o elevate velocità di rotazione. Le proprietà di questi dispositivi sono dovute direttamente alle caratteristiche fisiche dei gas. Un gas è un lubrificante con un comportamento affidabile, non cambia di stato e non si degrada in condizioni di lavoro estreme. Per questo i cuscinetti ad aria possono essere utilizzati in turbo macchine con temperature di esercizio sopra i  $500^{\circ}\text{C}$  e in dispositivi con temperature di lavoro vicine lo zero assoluto. La viscosità di un gas è pressoché costante all'interno di grandi intervalli di temperatura, al contrario di lubrificanti liquidi. I gas sono anche immuni agli effetti delle radiazioni. Una delle caratteristiche dell'uso dei cuscinetti ad aria è la quasi assenza di attrito dovuto alla bassa viscosità dei gas, minimizzando anche la generazione di calore, il che li rende il dispositivo ideale per aumentare il rendimento di alcune macchine ed abbattere le emissioni per il raggiungimento degli obiettivi UN Sustainable Development Goals [1]. I cuscinetti ad aria possono appartenere a tre tipologie: i cuscinetti pneumostatici, dinamici e ibridi. I primi lavorano grazie all'immissione di aria compressa, i secondi sfruttano fenomeni dinamici legati al moto. I cuscinetti ibridi usano entrambe le tecniche. Questo elaborato si occupa di cuscinetti pneumostatici piani. Il gas più comunemente utilizzato è l'aria. Solitamente, l'aria in ingresso al pattino non deve contenere olio e dovrebbe essere filtrata meglio rispetto alla comune aria tecnica. Per enfatizzare l'importanza sulla pulizia dell'aria di alimentazione basti pensare che il meato che si forma tra il pattino e la pista è alto tra i  $5\text{-}20\ \mu\text{m}$ . Dalla figura 1.1 è osservabile come questa unità di grandezza si confronta con un grano di polvere  $4\ \mu\text{m}$  e altri possibili contaminanti. In aggiunta, il grado di tolleranza della superficie di lavoro del pattino e quella della pista, dovrebbe essere inferiore a un decimo dell'altezza del meato [2]. Gli ostacoli maggiori nell'uso dei pattini pneumostatici sono principalmente dovuti alla comprimibilità del gas e alla sua bassa viscosità, il che rende questi dispositivi ad essere particolarmente sotto smorzati. Per limitare i fenomeni di instabilità dinamica si è costretti a limitare la pressione di esercizio, limitando anche la capacità di carico e la rigidità dei cuscinetti ad aria.

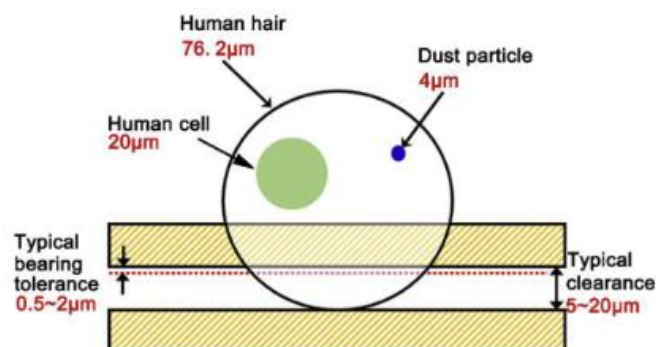


Figura 1.1 confronto altezza del meato con possibili contaminanti [2]

## 1.2 Principio di funzionamento

Il principio di funzionamento di un pattino pneumostatico è il medesimo, indipendentemente dalla forma della superficie di interfaccia o dal sistema di alimentazione, in figura 1.2 vengono esposti i sistemi di alimentazione più comuni e il corrispettivo profilo di pressione. Per semplificare la spiegazione si descrive il funzionamento di un pattino con foro singolo di alimentazione. Il pattino è collegato ad una sorgente di aria compressa. L'aria in pressione viene convogliata attraverso un foro sulla superficie del pattino. Il flusso d'aria creatosi si espande tra la superficie del pattino e la superficie di appoggio. Il meato in pressione crea una forza di repulsione tra le due superfici denominata portanza. In figura 1.3 viene presentato lo schema pneumatico a parametri concentrati di un pattino pneumostatico. Questo è costituito da una resistenza ( $R_1$ ) che modella il comportamento dell'ugello di alimentazione, il quale introduce una caduta di pressione ( $p_s - p_d$ ). La seconda resistenza ( $R_2$ ) descrive la perdita di pressione distribuita che si ha lungo il meato del pattino, questa dipende dall'altezza del meato. Tra le due resistenze si ha un volume, che rappresenta l'aria contenuta nel meato. Seguendo lo schema in figura 1.4, in condizioni di equilibrio tra portanza ( $W$ ) ed il carico del pattino si ha un meato ( $h_0$ ), incrementando il carico esterno ( $F$ ) il meato diminuisce ( $h_1$ ) e cresce la resistenza ( $R_2$ ) di conseguenza la pressione sotto il pattino ( $p_d$ ) cresce ad un valore ( $p_d'$ ) aumentando la portanza e riportando il sistema in equilibrio.

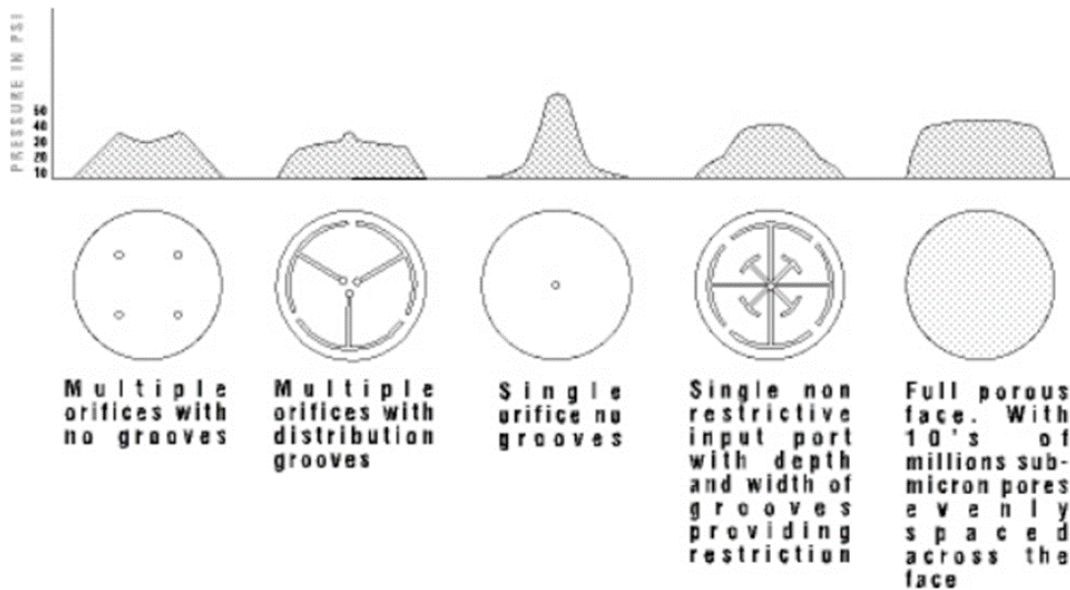


Figura 1.2 distribuzione della pressione per i sistemi di alimentazione più comuni [4]



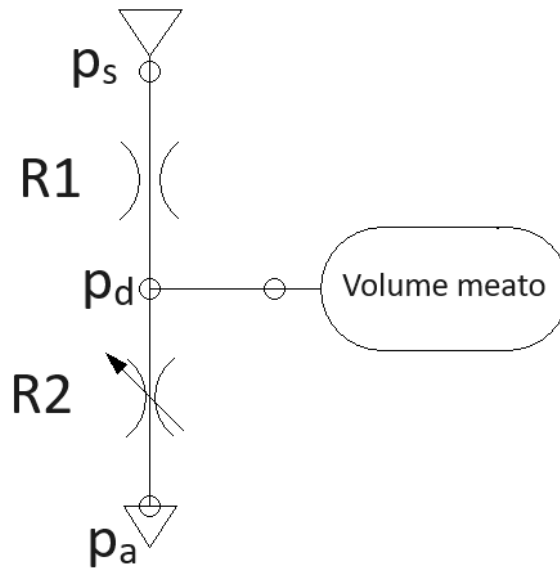


Figura 1.3 schema pneumatico pattino pneumostatico

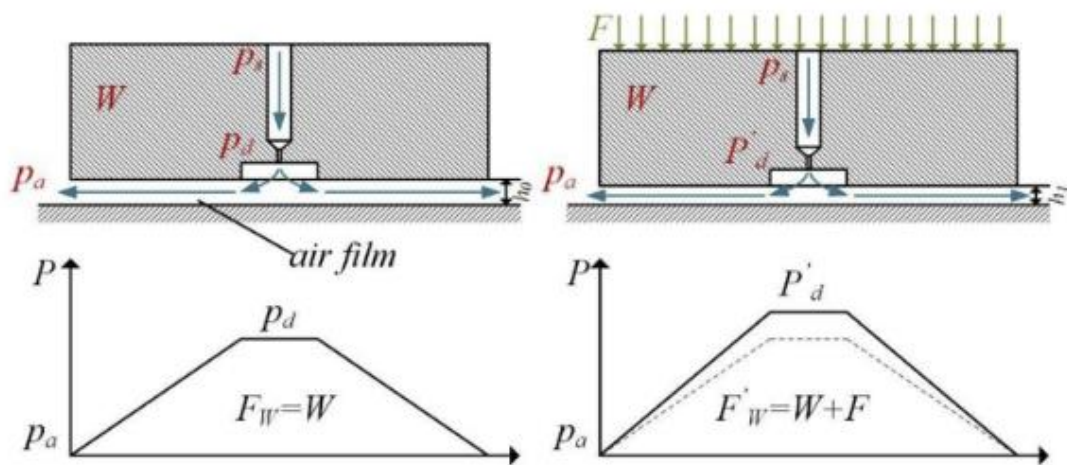


Figura 1.4 diagrammi distribuzione qualitativa della pressione per un pattino pneumostatico in condizione di esercizio e in caso di variazione di carico [2]

Caratterizzare staticamente un pattino consiste nell'esprimerne la capacità di carico, il consumo d'aria e la rigidezza in funzione dell'altezza del meato ( $h$ ): la prima dipende dalla superficie di lavoro del pattino e dalla distribuzione di pressione sotto di esso. Come si osserva in figura 1.5 ha un andamento non lineare e diminuisce all'aumentare del meato. Anche il consumo dell'aria non ha un andamento lineare ma aumenta all'aumentare del meato fino ad arrivare a condizioni di efflusso sonico, dove la portata è costante. La caratteristica di rigidezza ( $k$ ) viene definita a partire dalle curve di carico statico, osservando figura 1.6 si nota che, quando sul pattino si applica un carico, come la forza di reazione elastica abbia verso opposto rispetto allo spostamento del meato, quindi secondo la definizione  $k = -\frac{dF}{dh}$ . Si osserva l'andamento della rigidezza presenta punto di massimo.

Lo studio delle caratteristiche dinamiche di un cuscinetto pneumostatico è essenziale per evitare fenomeni di instabilità. Il fenomeno vibratorio che si manifesta, denominato pneumatic hammer è tipico dei cuscinetti pneumostatici, questo è il risultato di un ritardo di fase tra lo spostamento della superficie del cuscinetto e la distribuzione di pressione nel meato. L'instabilità dinamica è autoindotta e non richiede una forzante continuativa per manifestarsi. Alte pressioni di esercizio contribuiscono all'instabilità. È per questo che di norma i cuscinetti pneumostatici commerciali hanno pressioni di lavoro nominali inferiori ai 6 bar [5].

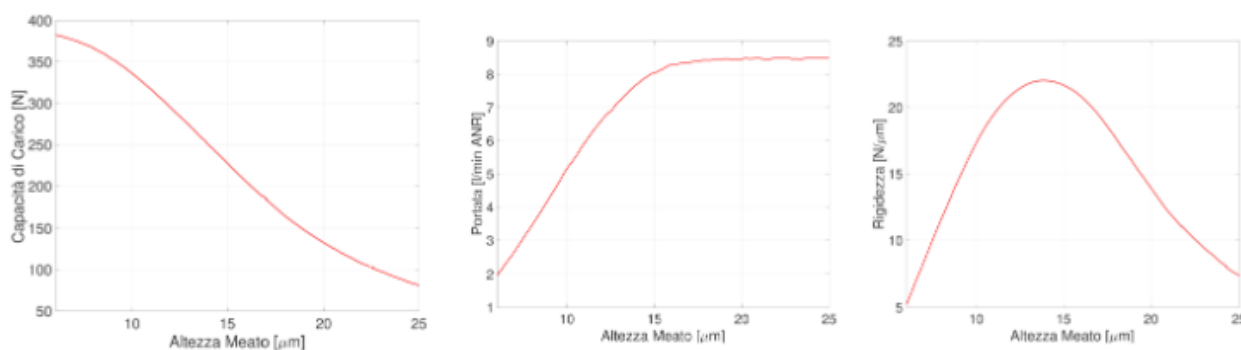


Figura 1.5 caratteristiche statiche pattino pneumostatico. da sinistra: capacità di carico, consumo dell'aria e rigidezza

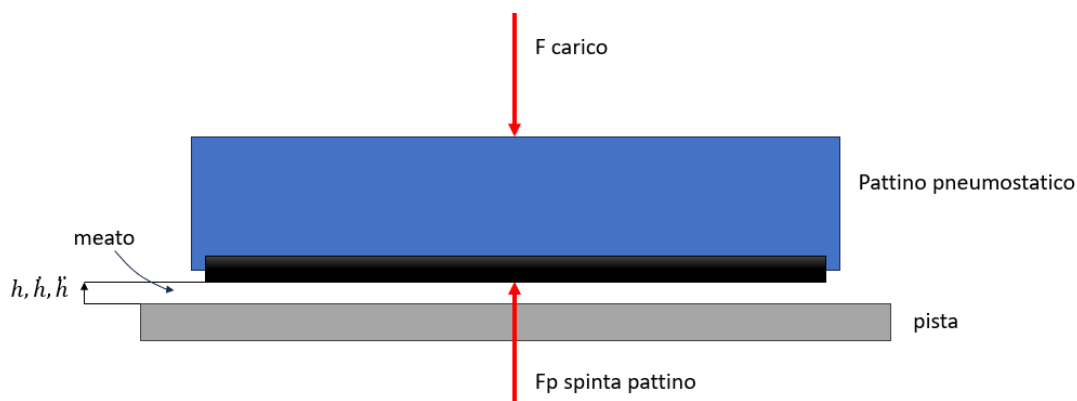


Figura 1.6 diagramma corpo libero pattino pneumostatico

Per controllare le caratteristiche statiche e dinamiche del pattino, innumerevole lavoro viene svolto sullo studio dei sistemi di alimentazione, sia per quanto riguarda il dimensionamento che, per quanto riguarda la manifattura. In figura 1.7 vengono confrontati i sistemi di alimentazione più comuni.

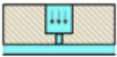

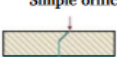
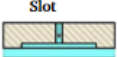
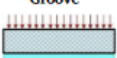
| Restrictor type  | Load capacity | Stiffness | Stability | Gas consumption | Manufacture |
|--|---------------|-----------|-----------|-----------------|-------------|
| <br>Annular orifice | Low           | Low       | Fair      | Small           | Easy        |
| <br>Simple orifice  | High          | High      | Poor      | Small           | Easy        |
| <br>Slot            | Medium        | Medium    | Good      | Large           | Medium      |
| <br>Groove          | High          | High      | Good      | Medium          | Hard        |
| <br>Porous          | High          | High      | Excellent | Large           | Hard        |

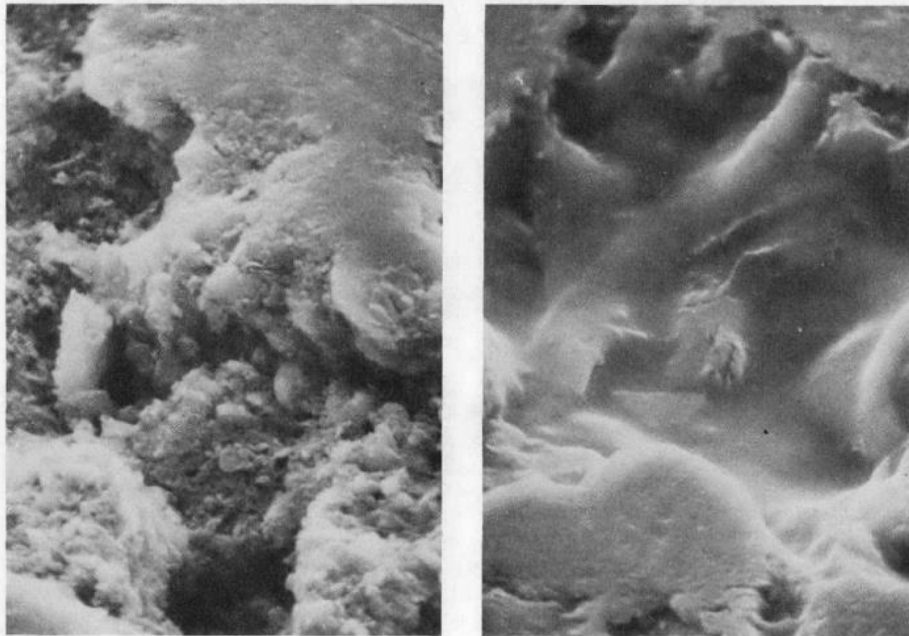
Figura 1.7 tabella che mette a confronto i vari sistemi di alimentazione con le loro prestazioni e la difficoltà di produzione [3]

I cuscinetti pneumostatici a orifizio sono i più comuni, questo perché si hanno molte informazioni per la loro progettazione e sono relativamente semplici da costruire, possono lavorare in regime turbolento in base alla pressione di alimentazione e l'altezza del meato, il che peggiora le prestazioni del pattino poiché nel profilo di pressione è presente un'area all'interno del meato in cui la pressione si abbassa prima di arrivare al bordo di uscita dell'aria, anche la modellazione risulta più complicata. Vengono distinti in due sottocategorie, cuscinetti pneumostatici ad anello (annular orifice) caratterizzati da una conduttanza minore per il passaggio dell'aria pari alla superficie  $\pi dh$  ( $d$  diametro del foro,  $h$  altezza meato). L'altra categoria è denominata a foro semplice (simple orifice) caratterizzati da una cava cilindrica profonda  $d/4$ , presentano conduttanza minore attraverso la superficie pari a  $\pi d^2/4$ , incrementando le prestazioni del pattino, ma aumentando la tendenza all'instabilità.

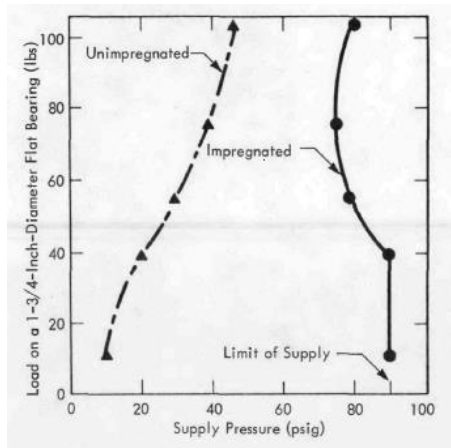
I cuscinetti a vena (slot bearings) simili ai cuscinetti pneumostatici ad orifizio ma con prestazioni migliori, sono caratterizzati da un canale per il passaggio dell'aria di sezione rettangolare spesso pochi micrometri. Lavorano in regime laminare, rendendone agevole la modellazione ma la loro manifattura risulta complessa.

Un'altra soluzione è quella dei cuscinetti con ragnatura, caratterizzati da cave sulla superficie attiva del pattino grazie alle quali viene distribuita l'aria. In questo modo il profilo di pressione è relativamente uniforme. Quindi le caratteristiche statiche sono migliorate. Nonostante questo, le complicazioni maggiori in fase di produzione non ne giustificano sempre la scelta rispetto ai cuscinetti pneumostatici ad orifizio.

I cuscinetti pneumostatici porosi impiegano un materiale poroso per alimentare il meato. L'inserto poroso è costituito da una complessa struttura di numerosi passaggi di dimensioni particolarmente piccole, questo lavora quasi sempre in regime laminare e il profilo di pressione è piuttosto uniforme. I cuscinetti pneumostatici porosi sono caratterizzati da un'alta rigidezza, capacità di carico, capacità di smorzamento e una buona stabilità pneumatica quando messi a confronto con altri tipi di cuscinetti pneumostatici. La stabilità dall'inserto poroso è dovuta all'effetto di smorzamento del passaggio dell'aria nei tortuosi passaggi, prima di arrivare alla superficie di interfaccia, questo effetto di smorzamento rende difficile un cambiamento repentino del volume d'aria nel meato [6]. Nonostante i vantaggi, parte dei canali di passaggio dell'aria sono chiusi aumentando il volume del meato con il conseguente calo di prestazioni. Data la complessità della struttura del materiale poroso, esistono problemi di ripetibilità in fase di costruzione. Una permeabilità eccessiva può portare un cuscinetto pneumostatico poroso in condizioni di instabilità. Proprio per questo è stata sviluppata una tecnica di impregnazione figura 1.8, per aumentare le prestazioni dei cuscinetti pneumostatici porosi figura 1.9, modificando la permeabilità dell'inserto poroso e potendone controllare la ripetibilità. La procedura prevede l'applicazione di una lacca acrilica sul cuscinetto poroso mentre questo viene alimentato con una pressione assoluta negativa [7].



*Figura 1.8 grafite non impregnata sinistra, grafite impregnata destra. ingrandimento 1000x [7]*

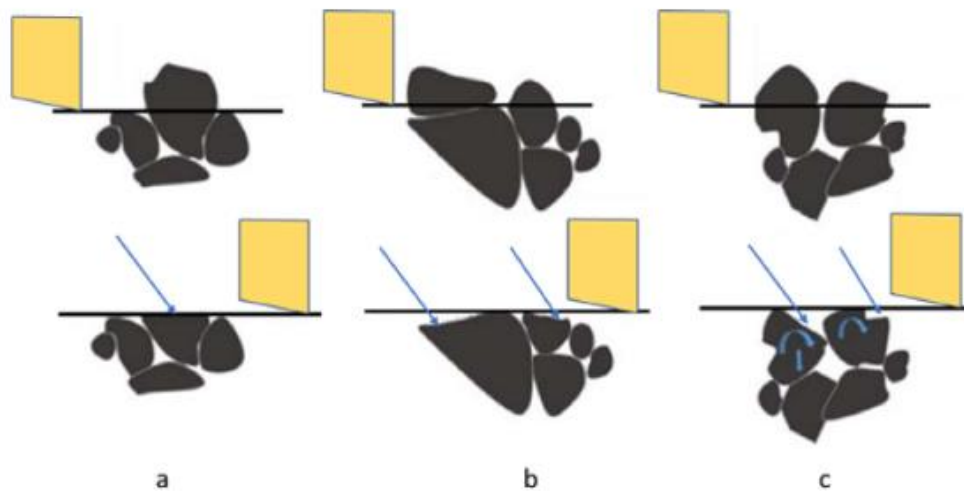


*Figura 1.9 stabilita pattino pneumostatico poroso in grafite impregnata vs non impregnata, la regione a destra della curva è instabile [7]*

Data la natura del materiale poroso, vi sono una serie di caratteristiche che rendono questi cuscinetti di particolare interesse. In caso di interruzione dell'aria di alimentazione il cuscinetto potrebbe collidere con la pista senza arrecare danni a questa, in particolare se l'inserto poroso è meno duro del materiale della pista. In aggiunta, nel caso la superficie "attiva" di un pattino pneumostatico poroso dovesse riportare una incisione ciò non dovrebbe pregiudicare il funzionamento in maniera catastrofica. Anche la presenza di corpo estraneo o contaminazione all'interno del cuscinetto, non porta ad un arresto istantaneo. Tuttavia, il ripristino del pattino potrebbe risultare impossibile, perché solitamente l'accoppiamento tra il corpo del pattino con l'elemento in grafite viene eseguito usando del materiale adesivo.

Lavorare la grafite richiede macchinari come torni e fresatrici dotate di particolari circuiti di aspirazione del truciolo, le polveri rilasciate sono dannose per l'uomo e arrecano danni ai macchinari. La grafite di per sé è un materiale particolarmente abrasivo; quindi, gli inserti da usare con le macchine per le lavorazioni devono avere caratteristiche specifiche [8].

Durante la lavorazione della grafite, l'asportazione del truciolo può avvenire in tre modi figura 1.10: a deformazione plastica, b rottura fragile, c rotazione dei grani. Nella manifattura di un inserto per un cuscinetto pneumostatico poroso, per ottenere una qualità superficiale ottimale è necessario che durante le lavorazioni l'asportazione di truciolo avvenga per deformazione plastica. La scelta del tipo di grafite è cruciale quando si vuole creare un cuscinetto pneumostatico poroso.



*Figura 1.10 illustrazione schematica dei tre meccanismi di taglio (a) deformazione plastica (b) rottura fragile (c) rotazione del grano [9]*

Come mostrato da [10] per verificare il meccanismo di taglio avvenuto su un inserto in grafite è possibile utilizzare un microscopio elettronico SEM. In figura 1.11 vengono riportate delle fotografie al microscopio elettronico, mostrandoci la superficie della grafite prima e dopo aver eseguito la procedura di taglio. A livello macroscopico i risultati sembrano identici, superficie piana e liscia. Tuttavia, grazie al microscopio elettronico si osserva quanto segue. In figura 1.11-a si può osservare il meccanismo di taglio per deformazione plastica. Questo significa che i grani di carbonio sono stati tagliati sul piano di lavoro dall'utensile. La figura 1.11-b, mostra il meccanismo di rottura fragile, avviene principalmente nei punti di bordo grano (punti a). Nella stessa immagine, contraddistinto dai (punti b) si osserva il meccanismo di frattura fragile che avviene nel cuore del grano di grafite, lasciando in questo modo delle superfici di frattura a forma di cratere distanti dal piano di taglio dell'utensile. Questo tipo di frattura provoca una rugosità elevata della superficie finale. Infine, il terzo meccanismo di frattura, figura 1.11-c rotazione dei grani. Le superfici (a) e (b) rappresentate in figura non sono complanari, il che significa che c'è stato uno spostamento del grano durante la fase di taglio. Risulta anche evidente che durante la fase di taglio c'è un elevato rischio che il truciolo rilasciato possa depositarsi all'interno delle porosità, rendendo difficile ottenere inserti in grafite con prestazioni identiche.

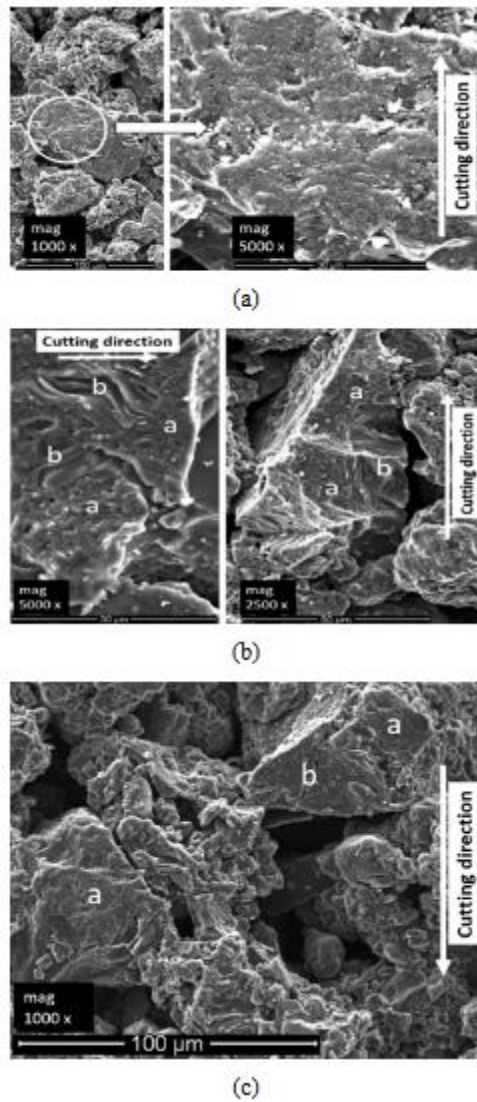


Figura 1.11 tre metodi di frattura (a) deformazione plastica (b) rottura fragile (c) rotazione dei grani [10]

Lo studio della portata di fluido che attraversa un corpo poroso, ha una grande importanza nell'analisi e la progettazione di un cuscinetto pneumostatico poroso. La permeabilità (K), consente di stabilire le prestazioni statiche e dinamiche di un pattino pneumostatico poroso. Nonostante esistano dei metodi moderni per valutare la permeabilità di un mezzo poroso, questi fanno affidamento alla qualità di termografie computerizzate [11]. Purtroppo, è difficile ottenere questo tipo di immagini per la grafite data la porosità su scala micrometrica. Storicamente l'uso della equazione di Darcy-Forchheimer ha permesso di ottenere buoni risultati analitici verificati da quelli sperimentali [12]. Anche se la legge di Darcy-Forchheimer è stata ricavata per interpolazione di dati sperimentali.

Nello specifico la legge di Darcy eq. 1.1, consente di ottenere una buona approssimazione della portata che attraversa un mezzo poroso. Quando la differenza tra le pressioni di monte e di valle del provino sono basse. I risultati dipendono quasi esclusivamente dalla permeabilità.

$$\frac{\Delta p}{\Delta x} = \frac{\mu v}{K} \quad \text{Eq. 1.1}$$

La legge di Forchheimer eq. 1.2 completa la legge di Darcy che tiene conto solo dei termini viscosi del fluido, consentendo di ottenere buoni risultati anche per elevate differenze di pressione, tra monte e valle del provino. Questo è possibile perché con la legge di Forchheimer vengono presi in considerazione anche i termini inerziali del flusso d'aria, introducendo un parametro aggiuntivo il coefficiente inerziale (c).

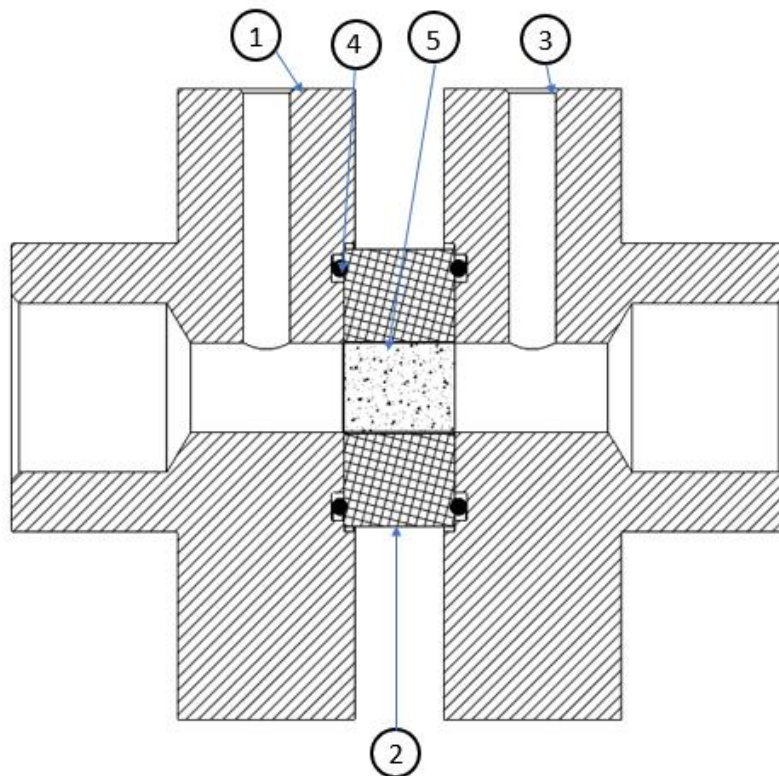
$$\frac{\Delta p}{\Delta x} = \frac{\mu v}{K} + c \frac{\rho v^2}{\sqrt{K}} \quad \text{Eq. 1.2}$$



# Capitolo 2

## 2.1 Banco di permeabilità

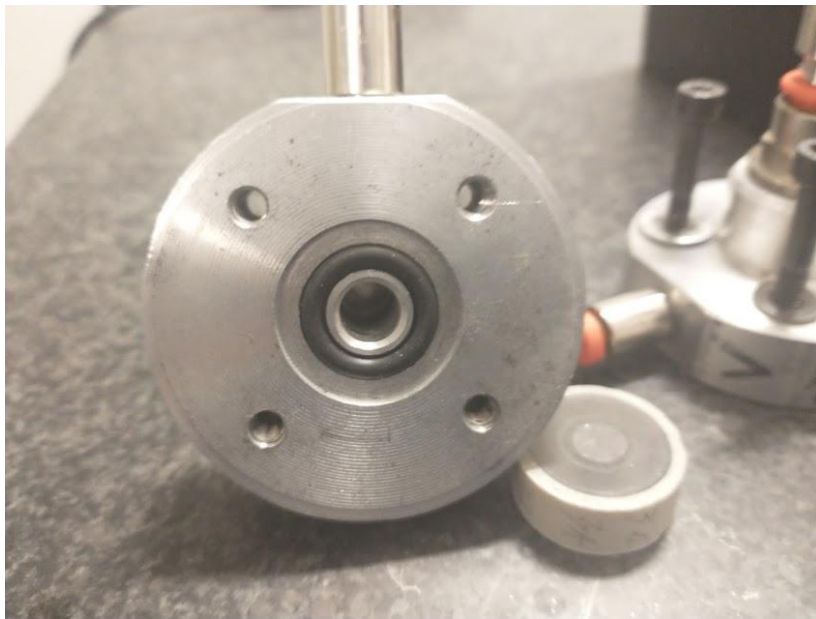
Per lo studio della permeabilità di provini in grafite, si è deciso di ripristinare un banco già presente in laboratorio, questo è stato utilizzato in passato per studiare il comportamento di materiale poroso in bronzo sinterizzato. Il banco figura 2.1 è costituito da due flange, ciascuna dotata di due porte. Una per il collegamento di un trasduttore di pressione, in maniera tale da poter leggere il valore della pressione di monte e di valle del provino. La seconda porta è necessaria per il collegamento dei tubi di mandata o scarico. Le flange, hanno una sede circolare da 25 mm di diametro alta 1 mm in cui alloggia il porta provino, è presente un'apposita gola per due o-ring di tenuta da 20x1.5 mm. L'unica differenza tra le due flange è che, una presenta quattro fori di montaggio passanti mentre l'altra ha i corrispettivi fori filettati. In figura 2.2-2.3 foto riportanti il banco montato e la sede di alloggiamento del provino con o-ring. A monte delle flange è disposto un sistema di filtraggio, un manometro e un regolatore di pressione. Come già detto il provino da testare è interposto tra le due flange e stretto in posizione da quattro viti. A valle delle flange viene montato un flussimetro e una resistenza regolabile. Schema pneumatico figura 2.4.



*Figura 2.1 sezione flange con provino inserito: 1 flangia, 2 porta provino, 3 flangia, 4 o-ring, 5 provino grafite*



*Figura 2.2 foto del banco di permeabilità montato*



*Figura 2.3 particolare del banco permeabilità sede provino con guarnizione di tenuta*

## GRUPPO ALIMENTAZIONE FILTRAGGIO

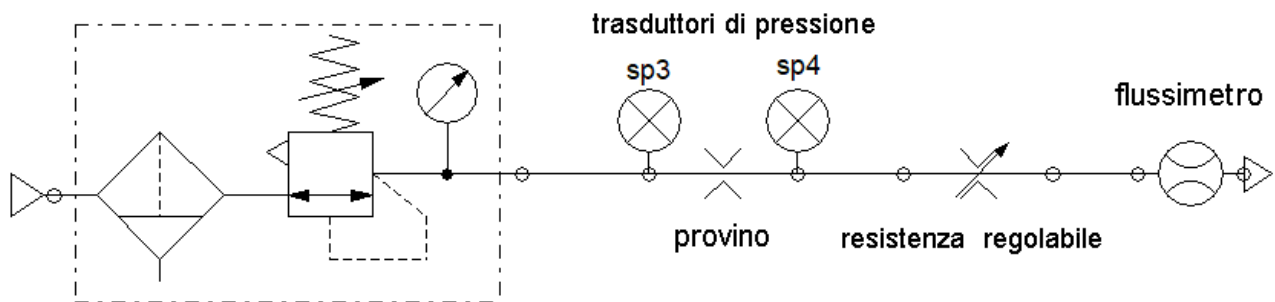


Figura 2.4 schema pneumatico banco permeabilità

## 2.2 Strumentazione del banco

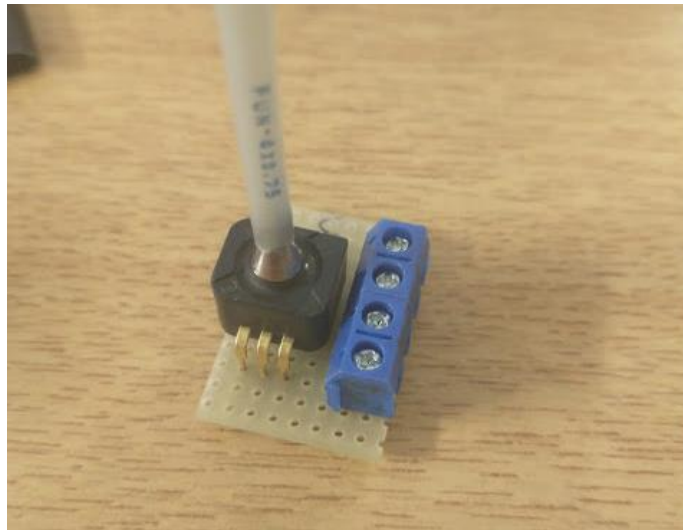
### 2.2.1 Trasduttori di pressione

Per la valutazione della pressione di valle e di monte del provino è stato deciso di utilizzare dei trasduttori di pressione della Honeywell modello 40PC150G figura 2.5-2.6. I trasduttori sono stati saldati su una apposita scheda elettronica e dotati di una morsettiera con i terminali di alimentazione e quelli di trasmissione dei dati. Prima di essere utilizzati è stato necessario determinare la caratteristica di funzionamento di ciascuno dei due trasduttori. In una prima fase sono stati marcati con un codice identificativo SP4 e SP3. Per tracciare la caratteristica di funzionamento è stato utilizzato un apposito strumento di calibrazione, Druck DPI 610 figura 2.7. Così facendo, è stato possibile ottenere i valori di riferimento eq. 2.1. Una volta installati sul banco la lettura della tensione di output è stata eseguita con due multimetri digitali.

$$p_{sp3} = 2,604 V_{sp3} - 1,292 \qquad p_{sp4} = 2,579 V_{sp4} - 1,322 \qquad \text{eq. 2.1}$$

| CATALOG LISTING | LEAD STYLE | PRESSURE RANGE | OVER-PRESSURE | SENSITIVITY     | OUTPUT PERFORMANCE AT 25°C AND 5.00±.01 VDC SUPPLY |           |
|-----------------|------------|----------------|---------------|-----------------|--|-----------|
|                 |            |                |               |                 | NULL (0 PSIG) VDC                                  | SPAN VDC  |
| 40PC150G2A      | 2          | 0 TO 150 PSI   | 300 PSI       | 26.6 mV/PSI TYP | .500±.040  | 4.000±.07 |

*Figura 2.5 specifiche trasduttore di pressione Honeywell 40PC150G*



*Figura 2.6 trasduttore di pressione Honeywell 40PC150G*



*Figura 2.7 apparecchio calibrazione pneumatica Druck DPI 610*

## 2.2.2 Resistenza regolabile

La scelta della resistenza regolabile e ricaduta sulla FESTO (GRO-M5) figura 2.8 in quanto caratterizzata da un'ottima risoluzione. Prima di arrivare a questa scelta sono stati provati svariati modelli con risultati non soddisfacenti.



*Figura 2.8 resistenza regolabile FESTO GRO-M5*

## 2.2.3 Flussimetro

Il flussimetro figura 2.9 scelto è il FESTO (SFAH-0.1U-Q6S), usato in combinazione con il FESTO (SFAH-0.5U-Q6S). È stato utile utilizzare due flussimetri, in quanto quello con fondo scala più basso è caratterizzato da una sensibilità più elevata, ottimale per rilevare i valori di portata quando la differenza tra la pressione di monte e di valle del provino è molto bassa. Per il funzionamento del flussimetro è necessario collegarlo ad un apposito alimentatore, mentre la lettura dei valori rilevati avviene attraverso il display del dispositivo.



*Figura 2.9 flussimetro FESTO SFAH*

## 2.3 Costruzione dei provini

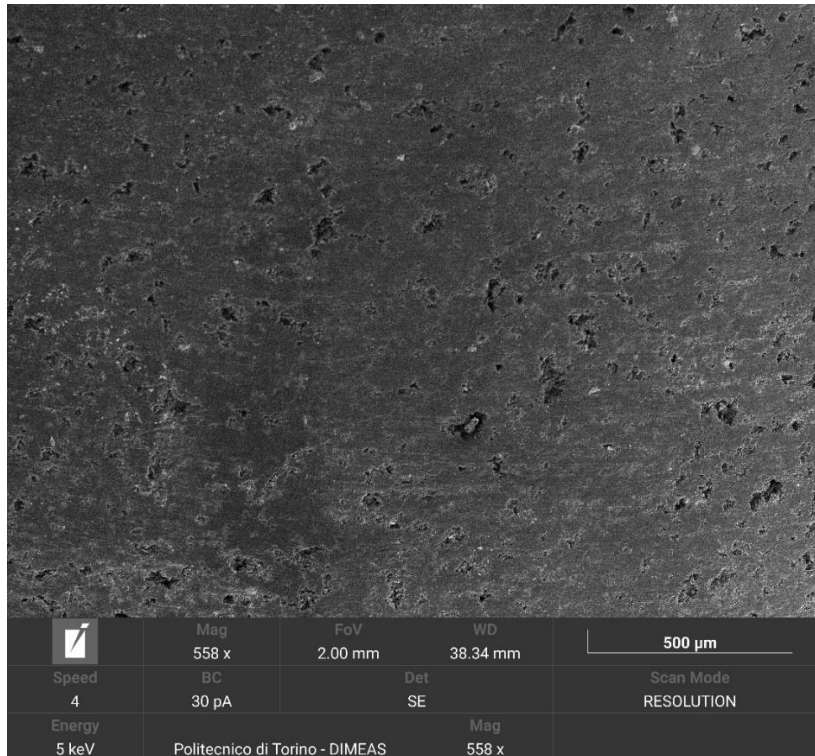
I provini sono stati ricavati da due bacchette in grafite cilindriche di 8 mm di diametro. Queste sono state reperite tramite amazon.it dal venditore EsportsMJJ, in figura 2.10 vengono riportate delle fotografie delle bacchette utilizzate. La porosità eq. 2.2 è una proprietà fisica dei materiali che indica la quantità di vuoti presenti al loro interno. La porosità media rilevata della grafite in studio è pari al 24.9 % (GRAFITE 25) e di 27.1% (GRAFITE 27).

$$\phi = 1 - \frac{m}{\gamma V} \quad \text{Eq. 2.2}$$

Dove  $\gamma = 2265 \text{ kg/m}^3$  è la densità della grafite senza pori,  $m$  è la massa della bacchetta misurata tramite bilancia di precisione e  $V$  il suo volume. Sono state eseguite delle scansioni al microscopio elettronico SEM della grafite in esame, lo scopo era di valutarne la grandezza dei grani e dei passaggi figura 2.11, non è stato possibile eseguire tali misure. Per poter essere testato, il provino deve essere montato su un supporto che ne consente l'alloggiamento tra le flange. Il porta provino deve essere compatibile con le guarnizioni del banco in maniera tale da evitare perdite d'aria verso l'esterno. In aggiunta il porta provino non deve consentire fughe d'aria interne. Tutta l'aria che attraversa il banco deve passare attraverso l'inserito in grafite, eventuali passaggi d'aria tra la superficie dell'inserito e del porta provino renderebbero le prove non valide. Per verificare la presenza di fughe interne è necessario che più provini con gli stessi parametri geometrici consentano di ottenere risultati ripetibili.



*Figura 2.10 in alto GRAFITE25 in basso GRAFITE27*



*Figura 2.11 visione al microscopio elettronico della GRAFITE 25*

### 2.3.1 Porta provino in ottone

In un primo tentativo, è stato deciso di costruire il porta provino partendo da un cilindro di ottone con diametro esterno 25 mm ed un foro al centro da 8 mm. Gli inserti in grafite sono stati tagliati della misura desiderata prima dell'incollaggio, eseguito con una colla siliconica (Motorsil). I provini costruiti con questa tecnica non hanno permesso di ottenere risultati ripetibili, poiché la misura del foro e quindi lo spessore della colla interferisce enormemente sulla tenuta. In figura 2.12-2.14, si può osservare a seguito di una ispezione dei provini, come la colla in rosso si distribuisce in maniera disomogenea.



*Figura 2.12 inserto in grafite smontato dal porta provino con silicone distribuito in maniera disuniforme sulla superficie*



*Figura 2.13 porta provino con materiale adesivo solo sul lato di montaggio*



*Figura 2.14 inserto in grafite smontato dal porta provino di Figura 2.13, silicone non presente.*



### 2.3.2 Porta provino in resina epossidica

Il metodo di costruzione dei porta provino rivelatosi successivamente affidabile, prevede l'impiego della resina epossidica. Questa è un polimero termoindurente, prima di venire attivata si trova allo stato liquido, diventa solida una volta unita all'indurente e passato il tempo specificato sulla scheda del prodotto. La resina utilizzata è della marca Resin Pro® figura 2.15.

La procedura di manifattura dei provini prevede il posizionamento della bacchetta di grafite all'interno di uno stampo cilindrico (tubo in PVC con diametro esterno di 25mm). È stato realizzato mediante stampa 3D un apposito supporto per il centraggio della grafite rispetto al tubo figura 2.16. Il supporto stampato ha anche lo scopo di tappare l'estremità inferiore del tubo, è stata usata una colla siliconica per garantire la tenuta tra il supporto stampato ed il tubo figura 2.17. Una volta preparato lo stampo è possibile attivare la resina epossidica unendo i due componenti. Per evitare la presenza di bolle nel prodotto finito sono state prese le seguenti precauzioni: utilizzare la resina non sotto i 30°C, unire i due componenti del composto versandoli molto piano in un contenitore usa e getta, in questo caso è stato utilizzato un bicchiere di carta, miscelare il composto per tre minuti con movimenti circolari a bassa velocità e lasciare riposare il composto per cinque minuti. Per definire la quantità di resina necessaria è stato sufficiente moltiplicare la densità della resina, pari a 1,1 g/cm<sup>3</sup> per il volume da riempire. Lasciare riposare la resina prima della colata è molto utile, così facendo parte delle bolle formatesi verranno eliminate. Una volta versato il composto nello stampo è stato necessario attendere due giorni.

Passato il tempo necessario all'indurimento è stato possibile procedere con il taglio dei provini. Per garantire un buon grado di parallelismo tra le facce dei provini è stata utilizzata una sega a nastro orizzontale. Si è reso necessario levigare le facce dei provini ottenuti per evitare fughe d'aria verso l'esterno, a tale scopo è stata utilizzata della carta vetrata a varie gradazioni (dalla 240 alla 800). In figura 2.18 è possibile osservare il risultato finale.

Grazie a questa procedura è stato possibile ottenere provini di circa 3 mm, 5 mm e 10 mm di lunghezza per la GRAFITE 25 e da 4 mm per la GRAFITE 27. Alcuni dei provini ottenuti specialmente quelli più sottili presentavano dei difetti riconducibili o alla presenza di bolle o alle perdite avvenute tra il tubo e il supporto di centraggio, in figura 2.19 viene evidenziata la presenza del difetto per uno dei provini scartati.



Figura 2.15 flaconi resina epossidica Resin Pro® utilizzata

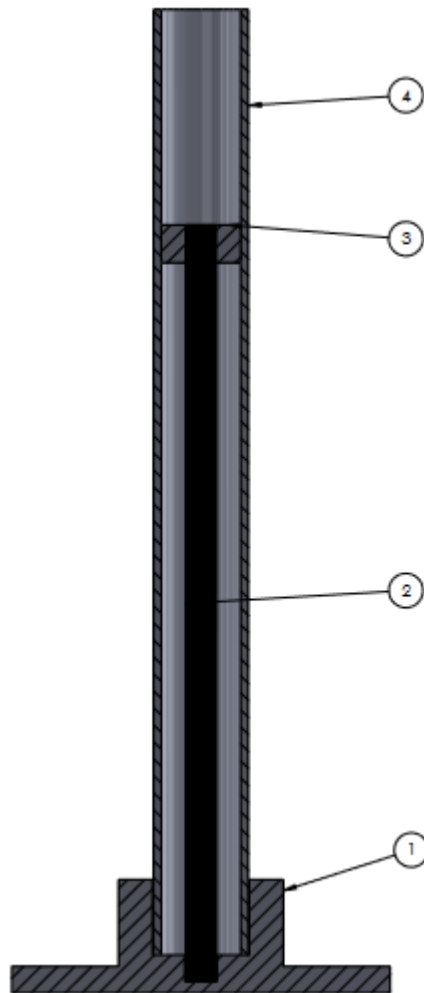


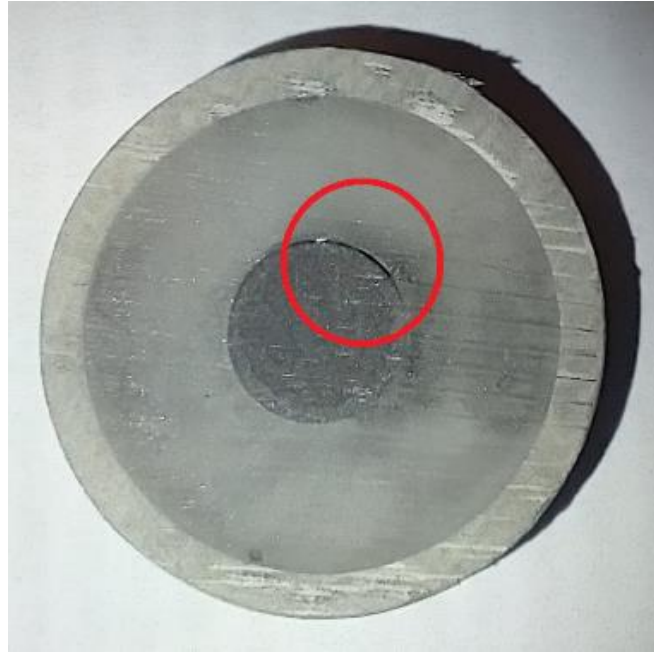
Figura 2.16 assieme stampo produzione provini: 1 base inferiore, 2 bacchetta grafite, 3 supporto centraggio, 4 tubo stampo



*Figura 2.17 particolare posa della colla siliconica nella base inferiore dima stampo provini*



*Figura 2.18 provino pronto per essere testato sul banco, sulla sinistra GRAFITE 25 sulla destra GRAFITE 27*



*Figura 2.19 provino difettoso, difetto evidenziato dal cerchio rosso*

## 2.4 Procedura esecuzione delle prove permeabilità

Ogni provino presenta un codice di identificazione alfanumerico, il codice è composto da una prima lettera che ne determina l'altezza ed il tipo di grafite e un numero utile per distinguere i provini con gli stessi parametri geometrici.

| Provino | Lunghezza [mm] | $\phi$ |
|---------|----------------|--------|
| A1      | 10.2           | 0.249  |
| A2      | 9.6            | 0.249  |
| A3      | 10.2           | 0.249  |
| B1      | 5.7            | 0.249  |
| B2      | 5.8            | 0.249  |
| B3      | 5.7            | 0.249  |
| C1      | 3.5            | 0.249  |
| C2      | 3.9            | 0.249  |
| N7      | 4.3            | 0.271  |
| N8      | 4.5            | 0.271  |

Prima dell'esecuzione di ogni prova è stata verificata la presenza di fughe esterne, con l'accortezza di non danneggiare i provini serrando troppo le viti. I dati raccolti durante le prove sono stati organizzati in una tabella Excel figura 2.20. Per la lettura della pressione ambientale si è fatto riferimento alla stazione metereologica del dipartimento di fisica dell'università di Torino.

La massa di ogni singolo provino è stata ricavata dal prodotto del volume, approssimabile a quello di un cilindro perfetto e della densità misurata dalla bacchetta intera.

È stato deciso di eseguire tre prove per ciascun campione a tre pressioni di alimentazione differenti: 6 bar, 5 bar e 4 bar. Una volta selezionata la pressione di alimentazione corretta, si eseguono le misure iniziando con la resistenza regolabile chiusa. Dopo di che si inizia ad aprire la resistenza regolabile fino a quando non si legge un cambiamento sul valore del flussimetro. Lo stesso procedimento va eseguito fino ad arrivare con la pressione di valle del provino pari a quella ambiente.

| p man<br>[bar] | p monte<br>sp4 [V] | p valle<br>sp3 [V] | Q flus.<br>[l/min] | D [m] | L [m]   | p<br>ambient<br>e [hpa] | m [kg]      |
|----------------|--------------------|--------------------|--------------------|-------|---------|-------------------------|-------------|
| 6              | 2,82               | 2,78               | 0                  | 0,008 | 0,01024 | 987,7                   | 0,000875022 |
| 6              | 2,82               | 2,75               | 0,002              | 0     | 0       | 0                       | 0           |

*Figura 2.20 parziale tabella raccolta dati, dalla colonna di sinistra pressione letta sul manometro di alimentazione, tensione in ciascuno dei due trasduttori, portata volumica in condizioni normali, diametro inserto in grafite, lunghezza dell'inserto, pressione ambiente, massa dell'inserto*

## 2.5 Modello calcolo della portata teorica

### Nomenclatura

| Simbolo    | Descrizione  | Valore                | Unità di misura |
|------------|--|-----------------------|-----------------|
| $m$        | Massa  | -                     | kg              |
| $L$        | Lunghezza provino                                  | -                     | m               |
| $p_a$      | Pressione ambiente                                 | -                     | Pa              |
| $p_1$      | Pressione assoluta monte                           | -                     | Pa              |
| $p_2$      | Pressione assoluta valle                           | -                     | Pa              |
| $\Delta p$ | P1-P2  |                       | Pa              |
| $Q$        | Portata volumica                                   | -                     | l/min           |
| $A$        | Area passaggio aria inserto                        | $5.026 \cdot 10^{-5}$ | $m^2$           |
| $\rho_g$   | Densità grafite                                    | 2265                  | $Kg/ m^3$       |
| $\mu$      | Viscosità dinamica dell'aria in condizioni normali | $1.77 \cdot 10^{-5}$  | $N s/ m^2$      |
| $R_g$      | Costante gas                                       | 287.1                 | $J/kg \cdot k$  |
| $T$        | Temperatura ambiente                               | 293                   | k               |
| $\rho_a$   | Densità aria ambiente                              | -                     | $Kg/ m^3$       |
| $\rho$     | Densità aria                                       | -                     | $Kg/ m^3$       |
| $G$        | Portata massica                                    | -                     | $Kg/s$          |
| $v$        | velocità   | -                     | m/s             |
| $\phi$     | porosità   | -                     | -               |
| $K$        | permeabilità                                       | -                     | $m^2$           |
| $v_{th}$   | Velocità teorica                                   |                       | m/s             |
| $Re$       | Numero di Reynolds                                 | -                     | -               |
| $f_k$      | Fattore di attrito                                 | -                     | -               |
| $K_m$      | Permeabilità media                                 | -                     | $m^2$           |
| $c$        | Coefficiente inerziale                             | -                     | -               |
| $G_{th}$   | Portata massica teorica                            | -                     | $Kg/s$          |

## Calcolo della permeabilità sperimentale

Per identificare il valore della permeabilità sperimentale si è partiti dalla legge di Darcy eq. 2.3.

$$\frac{dp}{dz} = \frac{\mu v}{K} \quad \text{Eq. 2.3}$$

$$v = \frac{G}{\rho A}$$

$$\rho = \frac{p}{R_g T}$$

$$G = Q \rho_a$$

$$G = \frac{\rho k A dp}{\mu dz}$$

$$\int_0^L G dz = \int_{p_1}^{p_2} \frac{\rho k A}{\mu} dp$$

$$G = \frac{(p_1^2 - p_2^2) K A}{L \mu 2 R_g T}$$

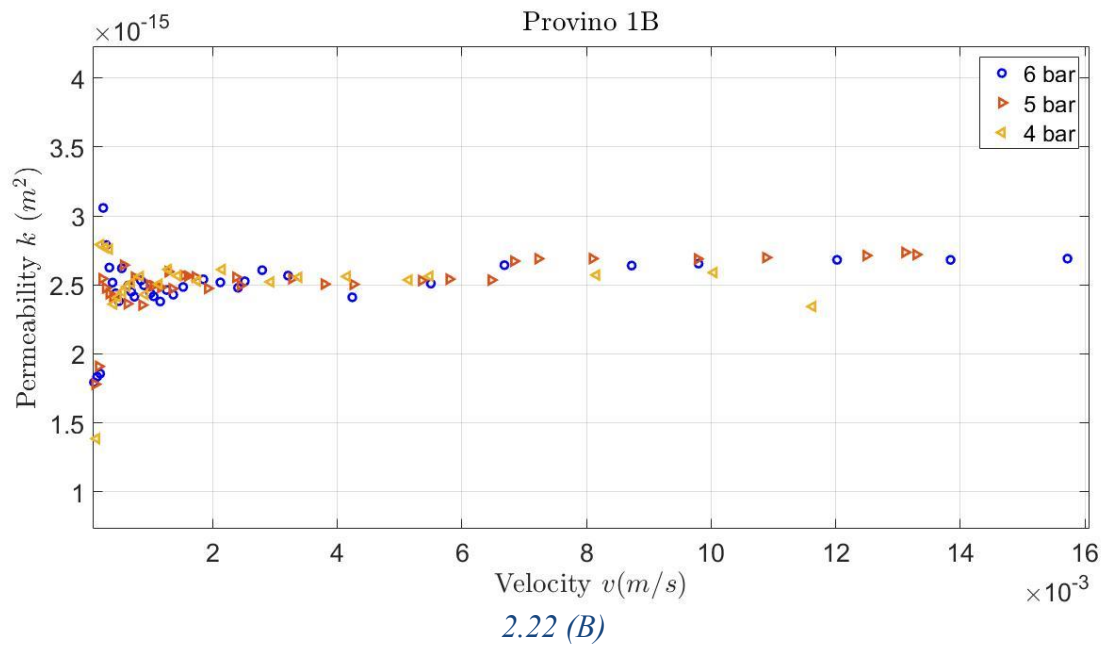
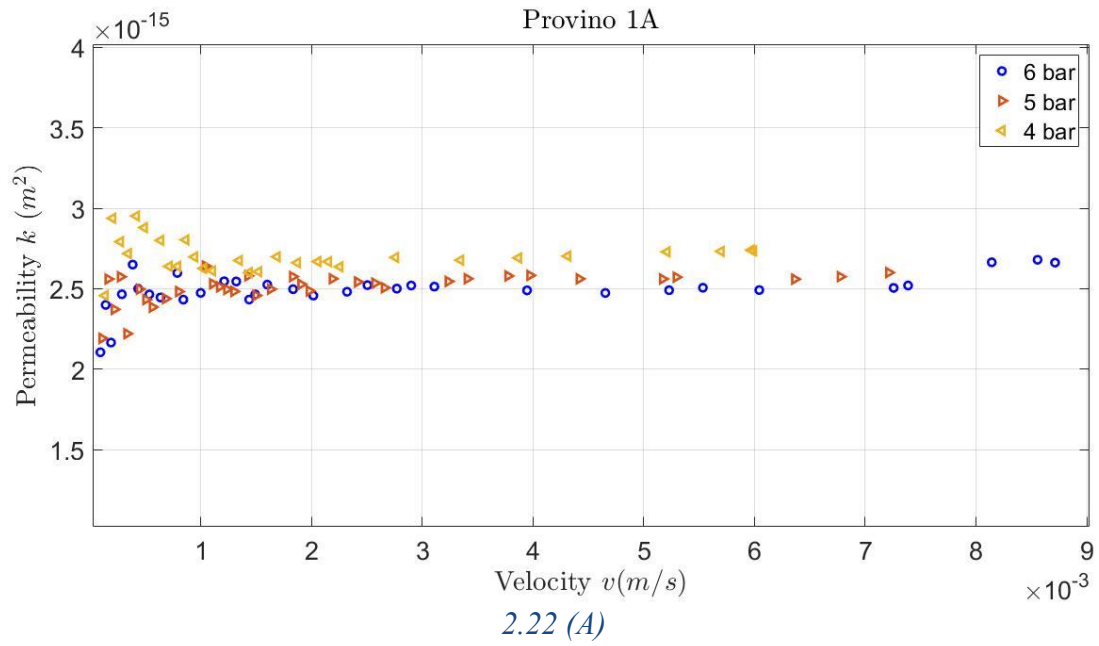
Di conseguenza, l'equazione utilizzata per valutare la permeabilità sperimentale è la eq. 2.4. Per ogni prova è stata stabilita una permeabilità media pari alla media dei primi 10 valori con velocità più bassa figura 2.21. Di seguito nella figura 2.22 vengono riportati i valori sperimentali ottenuti della permeabilità. Dai risultati ottenuti è possibile concludere che l'andamento della permeabilità in generale sembra cambiare molto a velocità estremamente basse per poi stabilizzarsi all'aumentare di questa. Confrontando i provini in GRAFITE 25 si nota come la pressione di alimentazione non influenzi K, mentre la lunghezza del campione sembra influenzare minimamente la permeabilità. Infatti, per i provini più sottili questa aumenta leggermente. La GRAFITE 27 figura 2.22 D, presenta un andamento della permeabilità nettamente diverso, e cambia in maniera più considerevole all'aumentare della velocità del flusso.

$$K = \frac{2 \mu G L R_g T}{A (p_1^2 - p_2^2)} \quad \text{Eq. 2.4}$$

| K media [m <sup>2</sup> ] | 4 bar                   | 5 bar                  | 6 bar                  |
|---------------------------|-------------------------|------------------------|------------------------|
| A1                        | 2.75 *10 <sup>-15</sup> | 2.43*10 <sup>-15</sup> | 2.42*10 <sup>-15</sup> |
| A2                        | 2.59*10 <sup>-15</sup>  | 2.60*10 <sup>-15</sup> | 2.40*10 <sup>-15</sup> |
| A3                        | 2.79*10 <sup>-15</sup>  | 2.55*10 <sup>-15</sup> | 2.33*10 <sup>-15</sup> |
| B1                        | 2.47*10 <sup>-15</sup>  | 2.36*10 <sup>-15</sup> | 2.40*10 <sup>-15</sup> |
| B2                        | 2.50*10 <sup>-15</sup>  | 2.5*10 <sup>-15</sup>  | 2.53*10 <sup>-15</sup> |
| B3                        | 2.41 *10 <sup>-15</sup> | 2.83*10 <sup>-15</sup> | 2.44*10 <sup>-15</sup> |
| C1                        | 2.40*10 <sup>-15</sup>  | 2.24*10 <sup>-15</sup> | 2.35*10 <sup>-15</sup> |
| C2                        | 2.44*10 <sup>-15</sup>  | 2.37*10 <sup>-15</sup> | 2.47*10 <sup>-15</sup> |
| N7                        | 1.36*10 <sup>-14</sup>  | 2.12*10 <sup>-14</sup> | 2.29*10 <sup>-14</sup> |
| N8                        | 1.81*10 <sup>-14</sup>  | 2.19*10 <sup>-14</sup> | 2.23*10 <sup>-14</sup> |

*Figura 2.21 permeabilità media calcolata come la media dei 10 valori sperimentali con velocità più bassa*





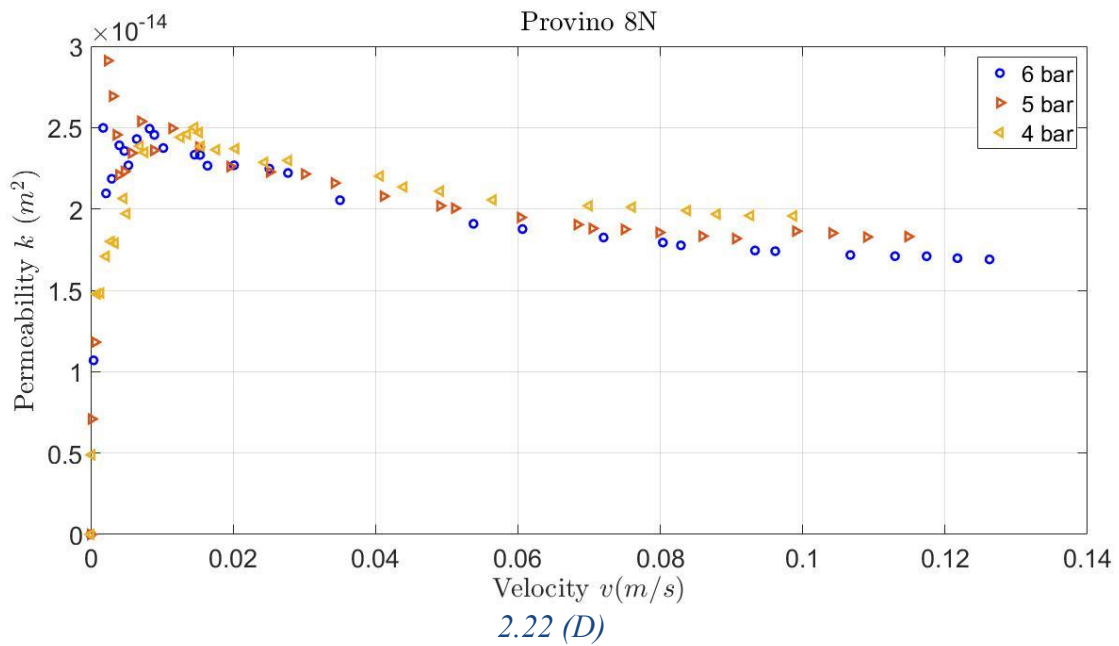
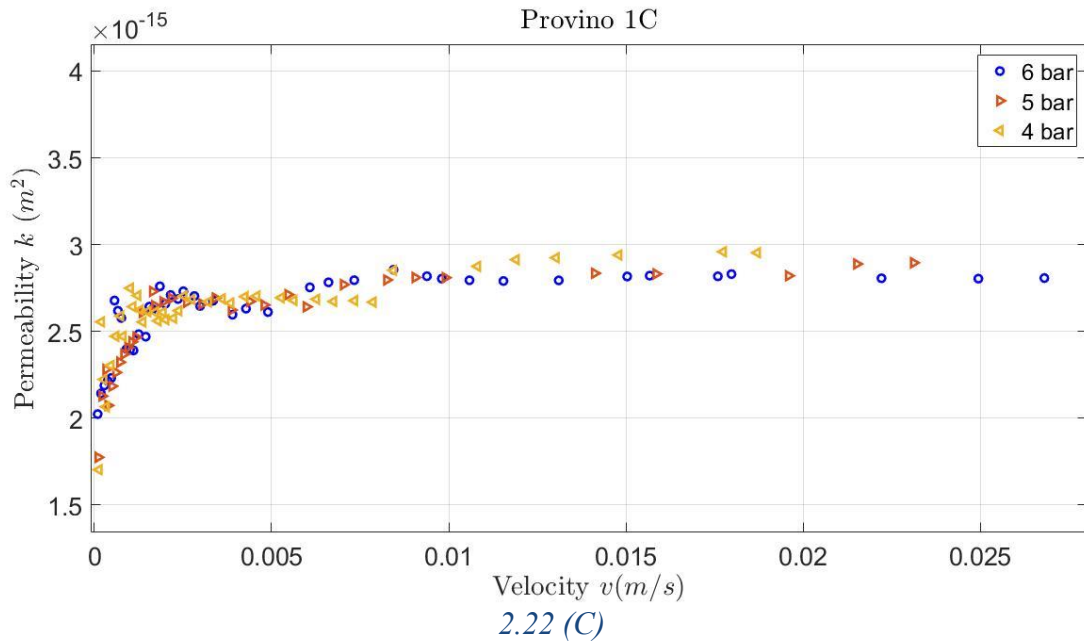


figura 2.22 (A - C GRAFITE 25, D GRAFITE 27) grafici riportanti l'andamento della permeabilità a tre pressioni di alimentazione relativa differente per ciascun provino in basse alla velocità del flusso che lo attraversa

Portata teorica

Per la modellazione della portata teorica è stato deciso di usare la legge di Forchheimer eq. 2.5.

$$\frac{\Delta p}{\Delta x} = \frac{\mu v}{K} + c \frac{\rho v^2}{\sqrt{K}} \quad \text{Eq. 2.5}$$

Per determinare il coefficiente di inerziale è stato necessario calcolare il numero di Reynolds basato sulla permeabilità eq. 2.6 e il coefficiente di attrito eq. 2.7

$$Re = \frac{\rho_m v \sqrt{K}}{\mu} \quad \text{Eq. 2.6}$$

$$f_k = \frac{\Delta p \sqrt{K}}{\Delta x \rho_m v^2} \quad \text{Eq. 2.7}$$

Una volta determinati i due valori è possibile ricavare il coefficiente inerziale eq. 2.8. Il valore preso come riferimento per il calcolo della portata teorica è quello con differenza di pressione maggiore figura 2.23, si è osservato come ci sia una grande variabilità del coefficiente inerziale sia al cambiare della pressione che al cambiare dei provini con le stesse caratteristiche, questo può essere dovuto ad un errore nella misura. Infatti, a portate elevate il flussimetro utilizzato non era quello con tolleranza maggiore, nel calcolo della portata teorica è stato usato un valore del coefficiente inerziale sperimentale diverso in base alla pressione di alimentazione. In figura 2.24 vengono mostrati i risultati ottenuti per i valori di  $Re$  e  $f_k$ . Per la loro valutazione è stato fatto riferimento ad una permeabilità sperimentale pari alla media di dieci valori con la differenza di pressione più bassa. Per ciascuna resistenza  $f_k$  e  $c$  tendono ad avere un valore costante per valori di  $Re$  abbastanza alti. Per la GRAFITE 25 l'andamento di  $Re$  e  $f_k$  non cambia al variare della pressione, al contrario di quanto accade con la GRAFITE 27

$$c = f_k - \frac{1}{Re} \quad \text{Eq. 2.8}$$

Sostituendo i valori sperimentali:  $\frac{\Delta p}{\Delta x}$ ,  $\rho$ ,  $v$  della permeabilità e del coefficiente inerziale nella legge di Forchheimer, è possibile scrivere l'equazione del secondo ordine 2.9 con incognita la portata teorica. In figura 2.25 vengono presentati i risultati ottenuti. È possibile affermare che i valori numerici ottenuti seguono in maniera fedele i dati sperimentali per i provini a spessore più alto A e B, al contrario per i provini più sottili C a pressione di alimentazione alte sembrano esserci dei punti in cui i valori teorici si discostano leggermente da quelli sperimentali. Per i provini N con una permeabilità più elevata si denota un discostamento dei valori teorici da quelli sperimentali a basse pressioni di alimentazione.

$$\alpha G_{th}^2 + \beta G_{th} + \varepsilon = 0 \quad \text{Eq. 2.9}$$

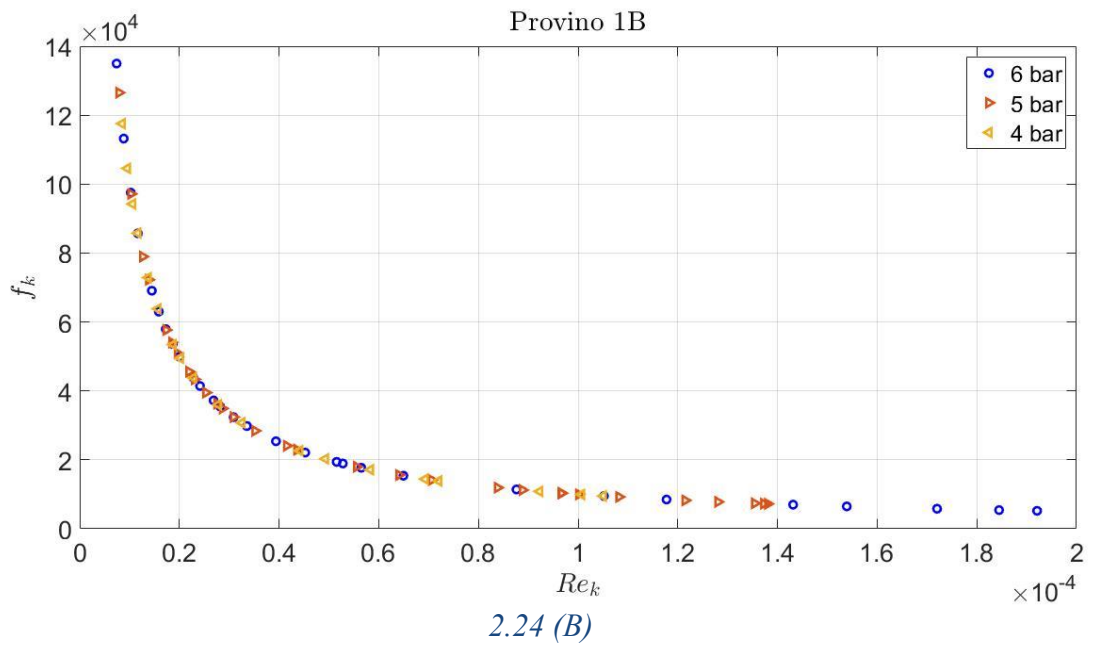
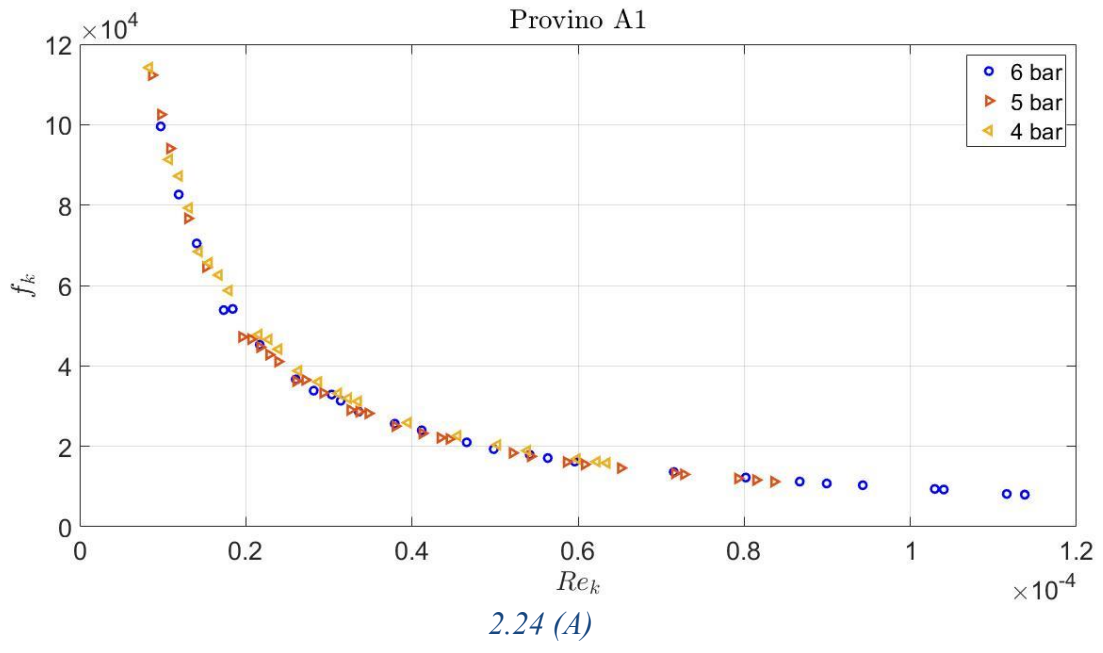
$$\alpha = \frac{32cRT}{\pi^2 D^4 \sqrt{K}}$$

$$\beta = \frac{8\mu RT}{\pi D^2 K}$$

$$\varepsilon = -\frac{(P1^2 - P2^2)}{L}$$

| c  | 4 bar  | 5 bar  | 6 bar   |
|----|--------|--------|---------|
| A1 | 119.7  | -756.9 | -776.2  |
| A2 | -702.5 | -109.1 | -168.8  |
| A3 | 109.9  | -636.7 | -696.4  |
| B1 | -549.4 | -862.5 | -519.1  |
| B2 | -200.2 | -409.6 | -252.9  |
| B3 | -840.5 | 103.2  | -503.6  |
| C1 | -1008  | -872.9 | -468.3  |
| C2 | -1045  | -737.3 | -395.28 |
| N7 | -115.4 | 51.78  | 82.7    |
| N8 | -27.19 | 49.74  | 64.42   |

*figura 2.23 coefficiente inerziale valutato nel punto con rapporto di pressione P2/P1 minore*



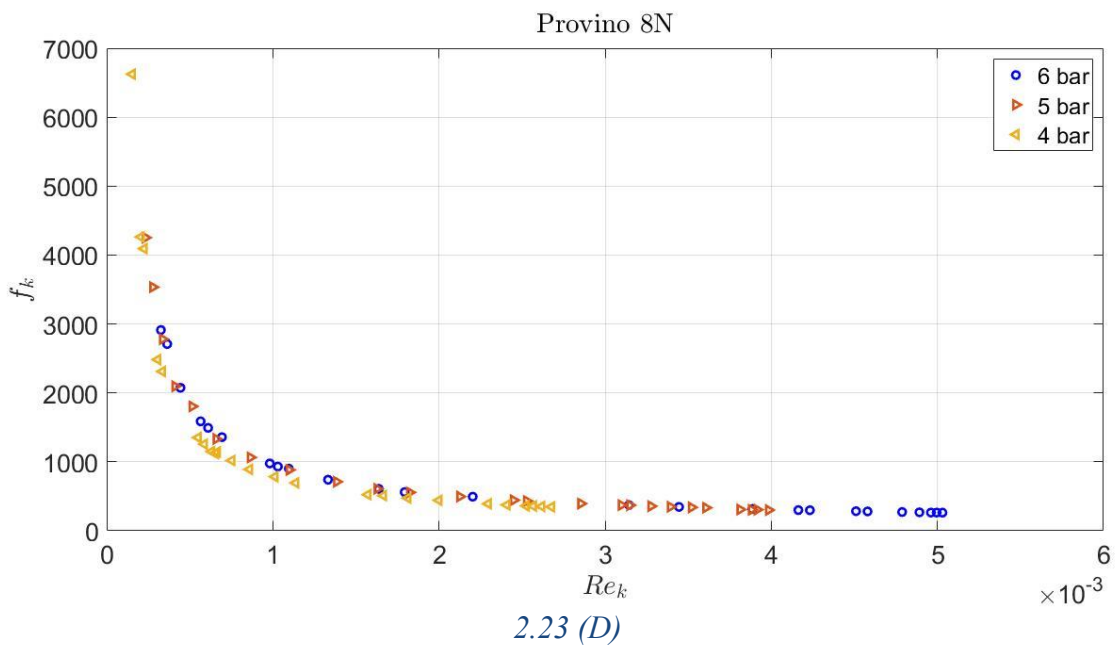
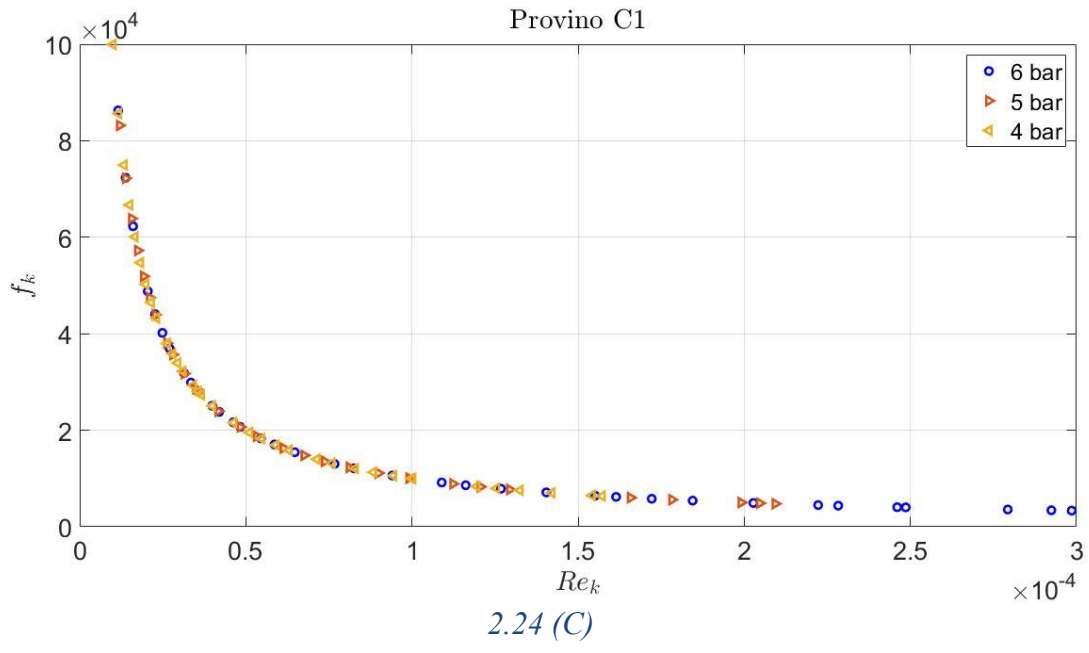
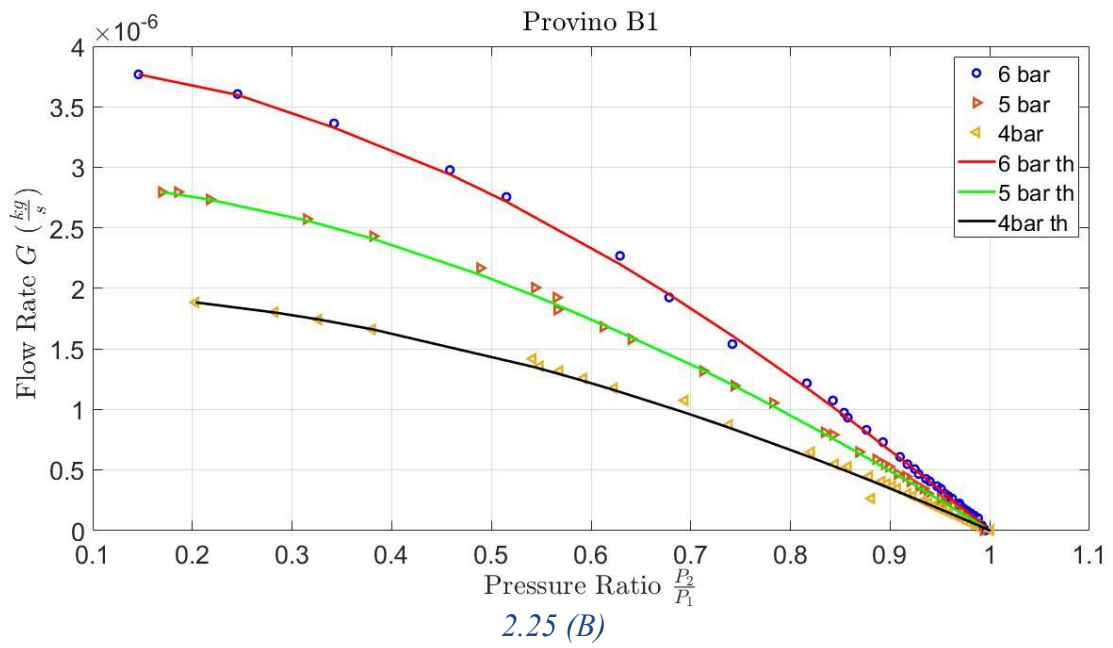
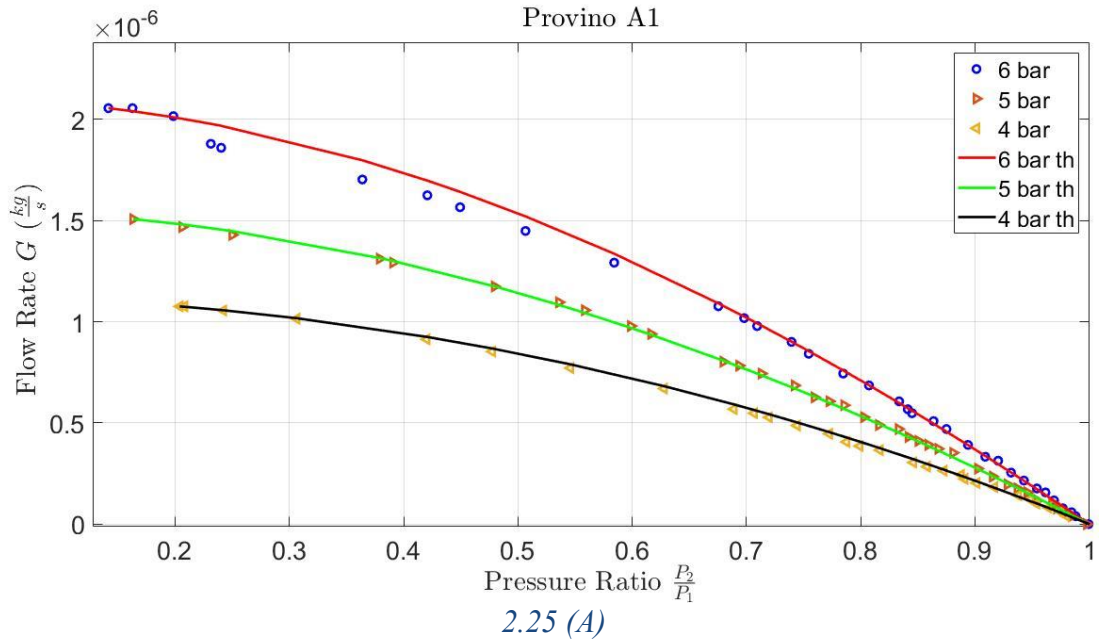


Figura 2.24 (A - C GRAFITE 25, D GRAFITE 27) valori di  $Re$  e  $f_k$  diagrammati per ciascun provino a 3 pressioni di alimentazione relative differenti



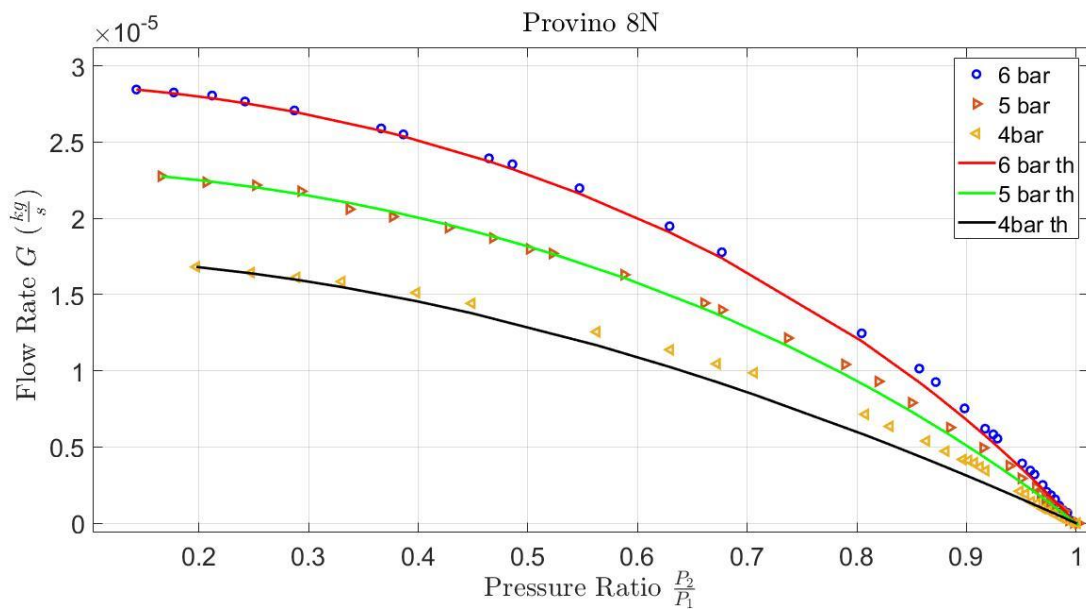
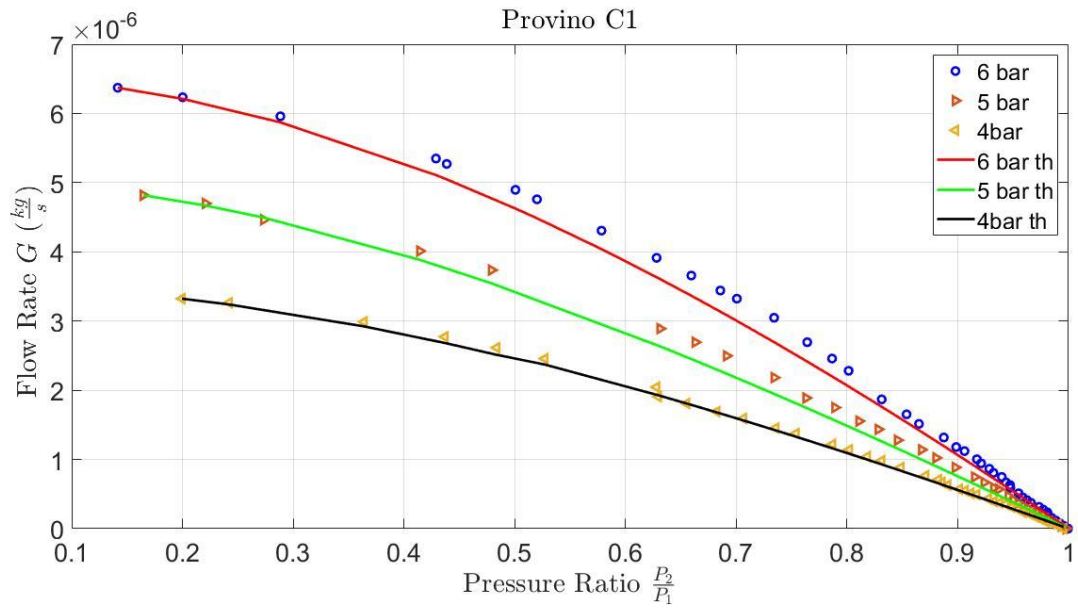
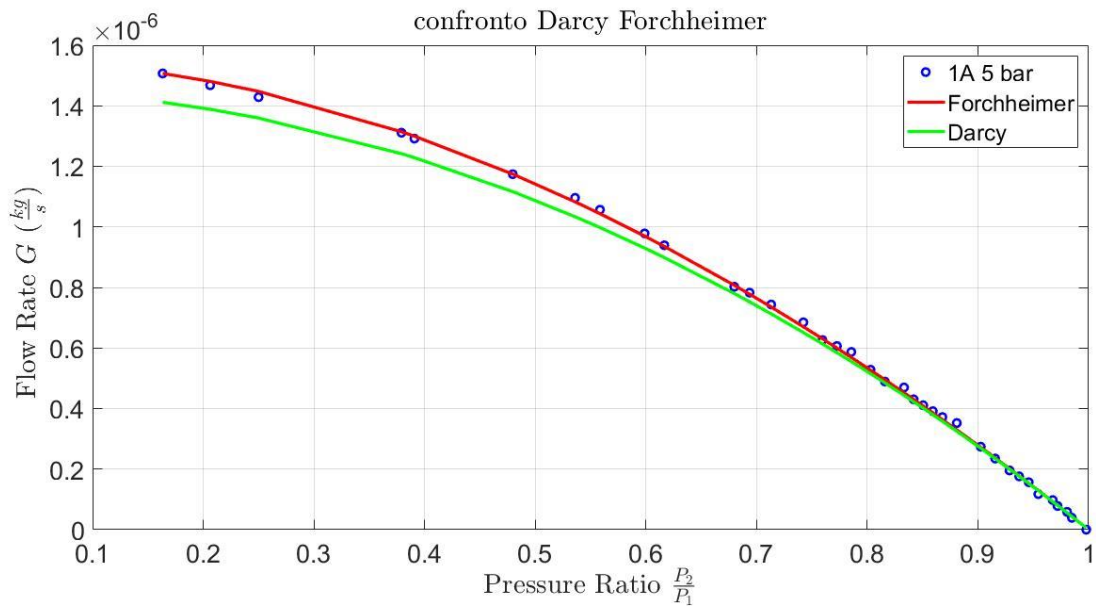


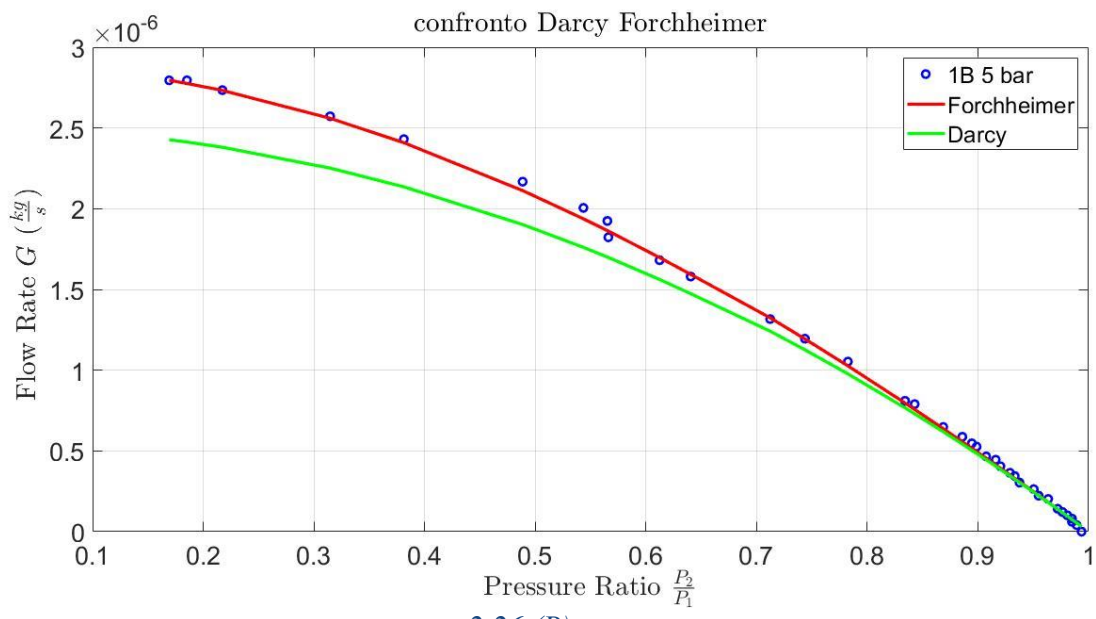
Figura 2.25 (A - C GRAFITE 25, D GRAFITE 27) valori della portata sperimentale e di quella teorica diagrammati per ciascun provino a 3 pressioni di alimentazione relative differenti



Infine, in figura 2.26 viene proposto il confronto tra le curve teoriche usando la legge di Forchheimer rispetto alla legge di Darcy e lo stesso valore di permeabilità. È interessante notare come per la GRAFITE 27 con permeabilità maggiore, la portata teorica ottenuta con la legge di Darcy sia maggiore dei risultati ottenuti con la legge di Forchheimer, per la GRAFITE 25 l'effetto è opposto.



2.26 (A)



2.26 (B)

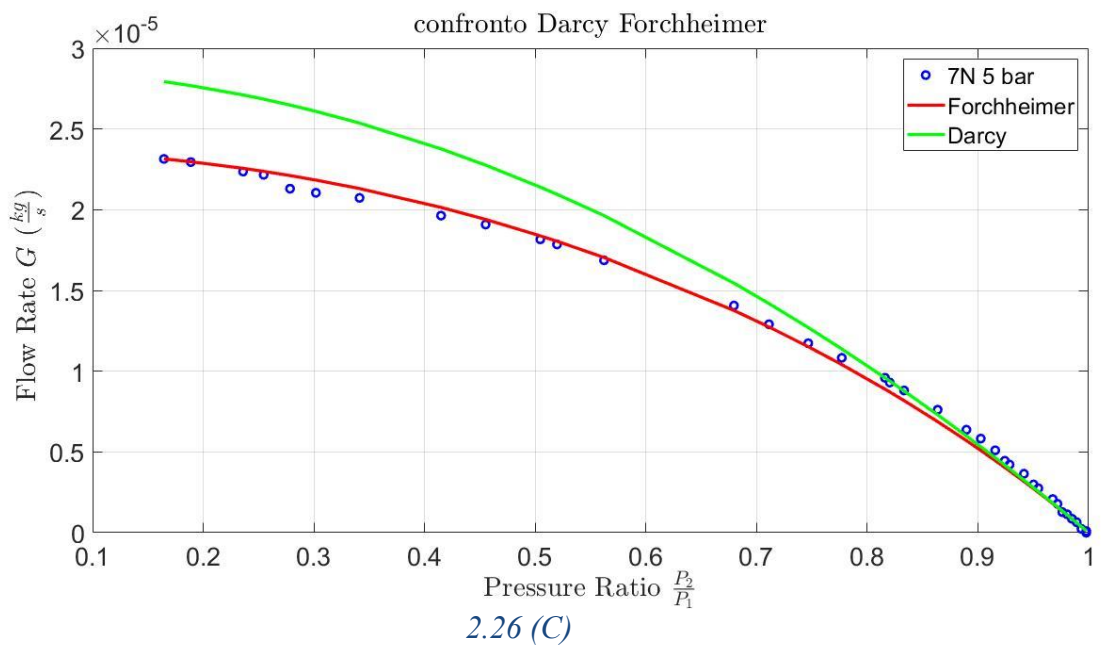
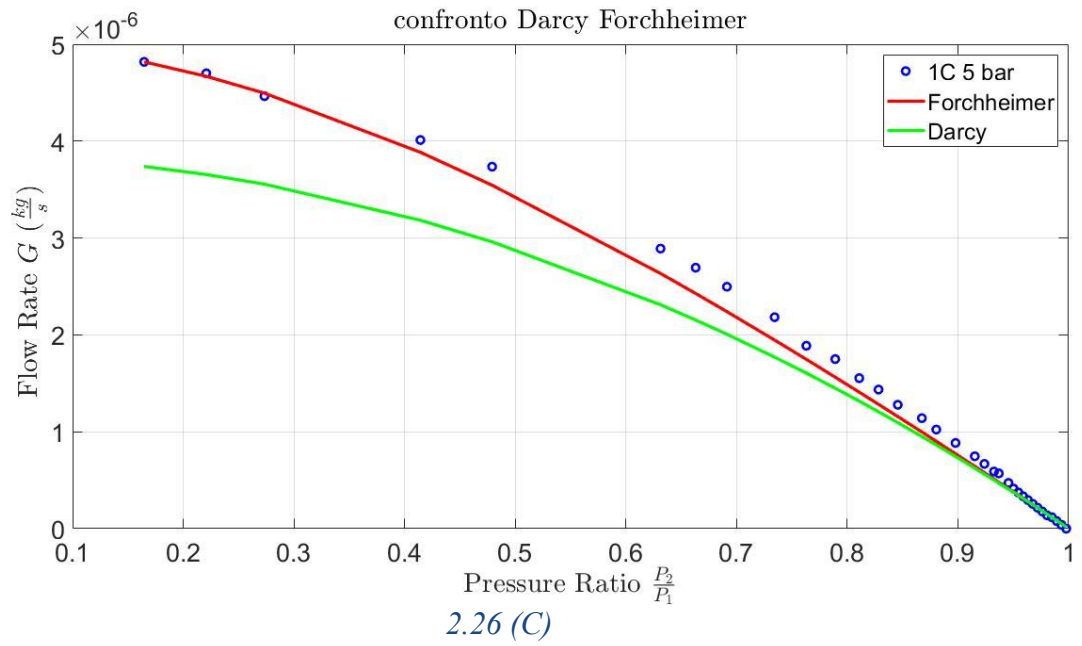


Figura 2.26 (A - C GRAFITE 25, D GRAFITE 27) valori della portata sperimentale e di quella teorica diagrammati per ciascun provino a 5 bar relativi mettendo a confronto modello di Darcy con quello di Forchheimer

# Capitolo 3

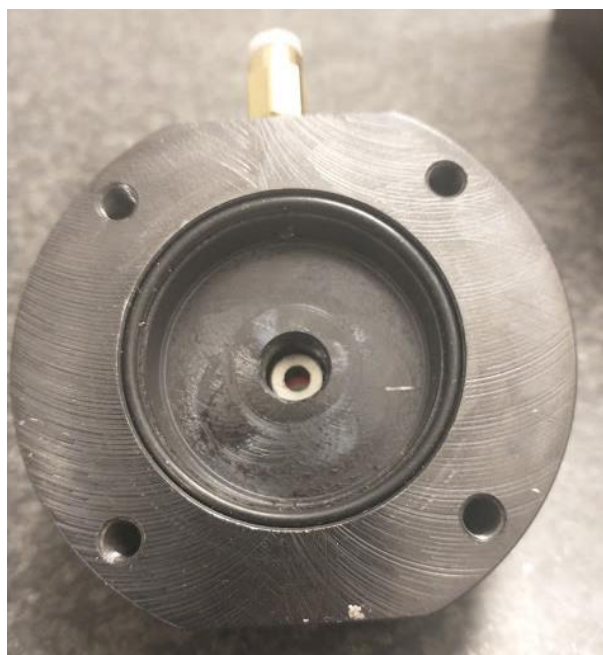
## 3.1 Banco permeabilità pattini pneumostatici porosi

Con lo scopo di approfondire ulteriormente le caratteristiche dei cuscinetti pneumostatici porosi si è deciso di produrre un banco per eseguire le prove di permeabilità su dei pattini pneumostatici porosi finiti. La scelta è nata con l'obiettivo di testare direttamente varie tecniche di produzione dei pattini oltre ad avere la possibilità di poter effettuare caratterizzazioni statiche, dinamiche e poter eseguire misure del profilo di pressione del pattino.

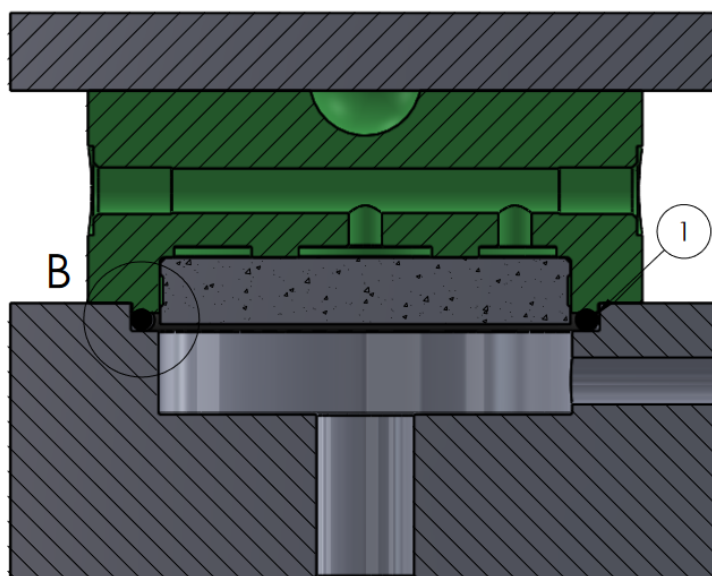
Il banco figura 3.1-3.2 è costituito da tre componenti: il pattino da testare, una piastra di fissaggio e una flangia. Quest'ultima presenta le porte per lo scarico dell'aria e per il montaggio di un trasduttore di pressione. Sul pattino sono presenti due porte, una per il collegamento di un trasduttore di pressione e l'altra per il condotto di mandata. Dalla flangia è stata ricavata una sede per l'alloggiamento del pattino e per la posa di un o-ring. Il pattino è dotato di un apposito profilo che consente una tenuta ermetica con la flangia. In figura 3.3 viene proposta una vista in sezione del banco, con il dettaglio B si evidenzia il profilo dell'accoppiamento flangia pattino. A monte delle flange è disposto un sistema di filtraggio, un manometro e un regolatore di pressione. Il pattino da testare è interposto tra la piastra e la flangia così da poter essere stretto in posizione da quattro viti. A valle delle flange viene montato un flussimetro e una resistenza regolabile. Schema pneumatico figura 2.4. In figura 3.4 viene riportata una fotografia del banco.



*Figura 3.1 banco permeabilità pattino, a sinistra la piastra di fissaggio sulla destra la flangia di scarico*



*Figura 3.2 flangia di scarico è possibile osservare l'alloggiamento per il pattino e l'o-ring di tenuta*



*Figura 3.3 vista in sezione banco permeabilità pattino, dettaglio B profili di accoppiamento, 1 o-ring*



*Figura 3.4 banco misura permeabilità pattino inserto poroso*

### 3.2 Progettazione Pattino pneumostatico poroso

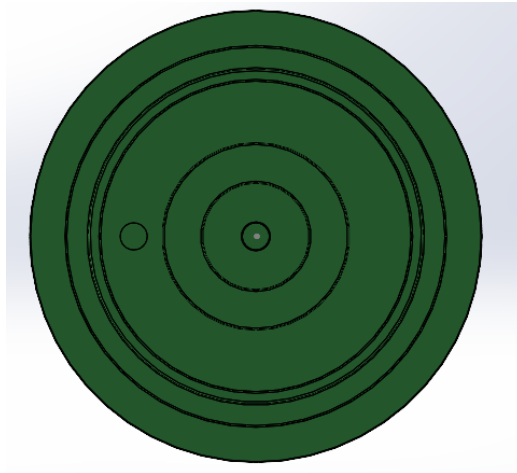
Il pattino è caratterizzato da una forma cilindrica di 50 mm di diametro, sulla superficie superiore è stata ricavata una sede per l'alloggiamento di una sfera da 10 mm necessaria per l'esecuzione di alcune prove dove è necessaria, in maniera simmetrica sono presenti due porte per l'alimentazione. Dalla superficie inferiore è stato dimensionato l'alloggiamento per un inserto in grafite cilindrico da 37 mm di diametro, l'inserto va in battuta su due aree circolari, in questo modo viene garantita una distribuzione dell'aria migliore. In figura 3.5 viene proposta la vista del piano inferiore del corpo del pattino in figura 3.6 la vista in sezione dello stesso.

L'accoppiamento inserto in grafite corpo del pattino viene garantito grazie ad un adesivo, il prodotto scelto è una colla epossidica bicomponente a base di alluminio della WEICON figura 3.7. La scelta è ricaduta su questo adesivo caricato con metalli perché dovrebbe limitare la contaminazione della grafite [7] e per la buona resistenza a taglio compresa tra 11 Mpa e i 20 Mpa in base alla superficie dove viene applicata. In figura 3.8 vengono riportate le caratteristiche meccaniche della colla utilizzata. È stato eseguito un calcolo di massima per verificare l'accoppiamento, considerando pari a 19 Mpa la resistenza a taglio  $\delta$  è pari a 4,5 mm l'altezza della superficie cilindrica di contatto S. La pressione scelta per il calcolo della forza F è pari a 10 bar. Nel eq. 3.1 e 3.2 vengono esplicitate le formulazioni utilizzate per il calcolo della tensione di taglio pari a 2 Mpa ed il coefficiente di sicurezza statico CS pari a 9. In seguito al montaggio del pattino non si sono verificati distaccamenti improvvisi dovuti alla pressione di esercizio.

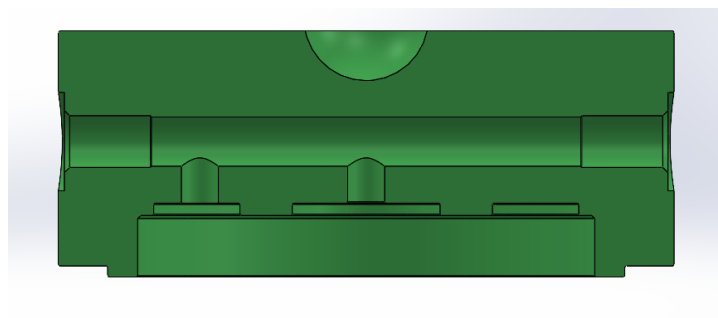
L'inserto in grafite per migliorare l'adesione con il corpo del pattino e garantire uno spessore di materiale adesivo minimo è stato dotato di una sede profonda 0,25 mm, in figura 3.9 viene mostrata la vista in sezione dell'inserto. Oltre ad un inserto con le superfici superiore ed inferiori piane è stato deciso di prevedere un inserto dotato di cave circolari per verificare un cambiamento delle prestazioni dovuto alla distribuzione dell'aria, in figura 3.10 e 3.11 è mostrata la vista di tali gole. In figura 3.12 è presente una foto dei due inserti.

$$\tau = \frac{F}{S} \quad \text{eq. 3.1}$$

$$CS = \frac{\delta}{\tau} \quad \text{eq. 3.2}$$



*Figura 3.5 vista piano inferiore del pattino*



*Figura 3.6 vista in sezione del corpo del pattino*



Figura 3.7 colla epossidica marca WEICON utilizzata

**Mechanical properties after curing**

|  |                  |                      |
|--|------------------|----------------------|
| Tensile strength                                       | DIN EN ISO 527-2 | 34 MPa               |
| E-modulus (tensile)                                    | DIN EN ISO 527-2 | 4.000 - 4.500 MPa    |
| Compressive strength                                   | DIN EN ISO 604   | 8 MPa                |
| Bending strength                                       | DIN EN ISO 178   | 58 MPa               |
| Hardness (Shore D)                                     | DIN ISO 7619     | 45                   |
| Lap shear strength material thicken. 1,5mm DIN EN 1465 |                  |                      |
| Steel 1.0338 sandblasted                               |                  | 20 N/mm <sup>2</sup> |
| Aluminium sandblasted                                  |                  | 19 N/mm <sup>2</sup> |
| PVC-rigid roughened                                    |                  | 11 N/mm <sup>2</sup> |

Figura 3.8 caratteristiche meccaniche colla epossidica alluminio WEICON

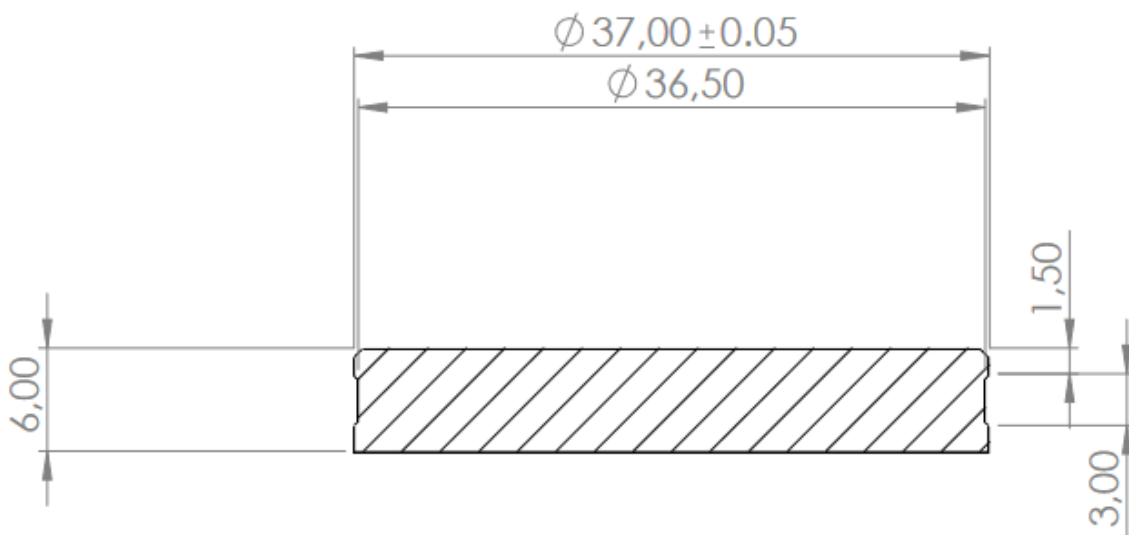


Figura 3.9 vista in sezione inserto grafite

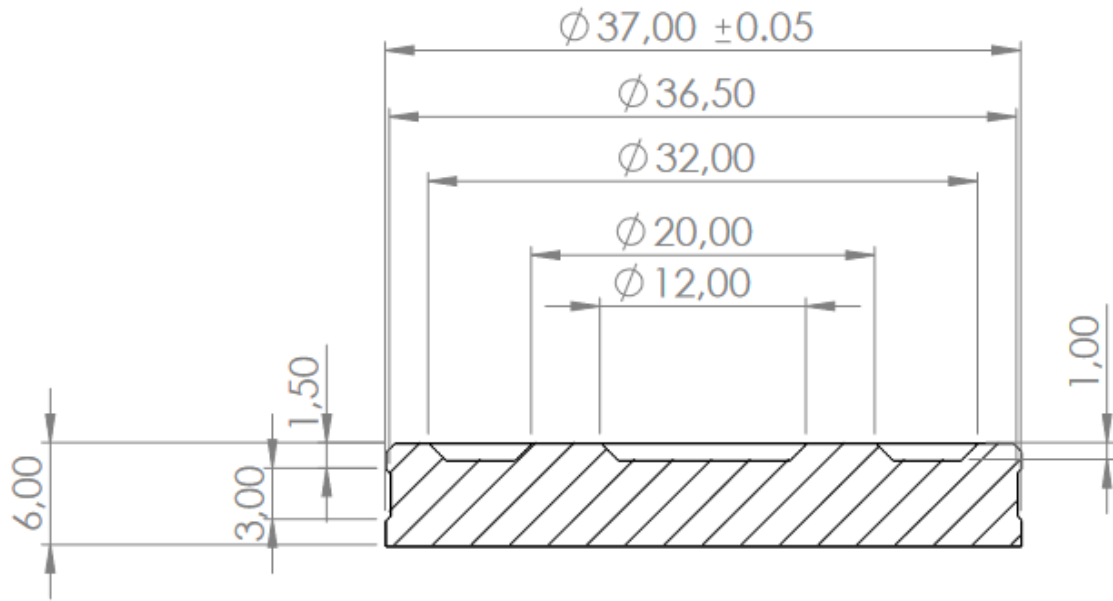


Figura 3.10 vista in sezione inserto in grafite con gole distribuzione aria

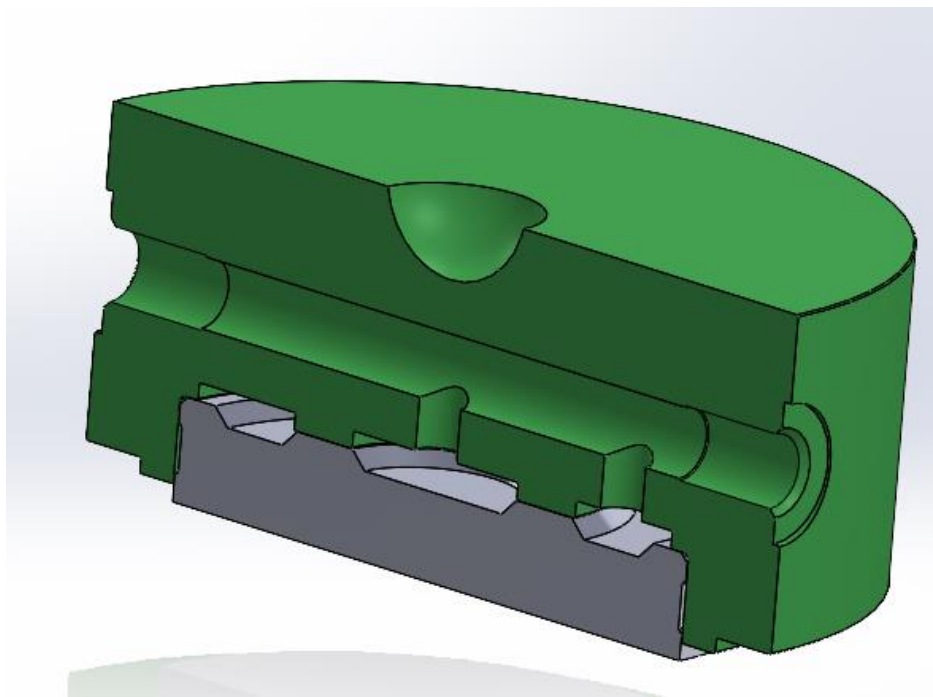


Figura 3.11 sezione in assonometria dell'assieme pattino con inserto inciso





*Figura 3.12 sulla sinistra inserto semplice sulla destra inserto con canali di distribuzione*

### 3.3 Produzione del banco e del pattino

La piastra di fissaggio e la flangia inferiore sono state prodotte in acciaio brunito, il corpo del pattino è stato prodotto in alluminio. Per la manifattura dei componenti ci si è affidati ad una ditta esterna. Per la scelta e la manifattura dell'inserto poroso ci si è affidati alla ditta ATAL sita in: Via Libero Grassi 3,5,7 20056 Trezzo sull'Adda (MI) Italia. In figura 3.13 è presente il datasheet della grafite consigliata. Non è stato possibile reperire la grafite utilizzata nel banco precedentemente descritto a causa di problematiche dovute alle lavorazioni.

L'applicazione della colla per l'accoppiamento inserto pattino presenta delle criticità. Infatti, il maneggio del materiale adesivo richiede particolari precauzioni data la pericolosità dei vapori emanati, si rende necessario l'ausilio di dispositivi di protezione per mani e viso. La procedura di incollaggio prevede la posa della colla sull'inserto poroso e successivamente l'inserimento di questo nella sede del pattino. Posare la colla sul pattino e poi montare l'inserto ha il potenziale rischio di non mandare l'inserto in battuta e di contaminare l'area dell'inserto attraverso cui deve passare l'aria, peggiorando le prestazioni del pattino, in figura 3.14 viene mostrato il pattino.

È stato anche costruito un pattino con il corpo realizzato tramite stampa 3D. L'obiettivo era di testare la possibilità di costruzione di prototipi e verificare la fattibilità di un pattino costruito in materiale plastico. In figura 3.15 viene mostrato il pattino costruito. Purtroppo, nonostante il corpo in plastica sia stato reso ermetico tramite l'applicazione di colla rapida sulla superficie esterna, si è presentata una incompatibilità tra il pattino ed il banco di permeabilità, l'o-ring presente nella flangia non faceva tenuta per le difettosità proprie della stampa 3D.

### Graphite AT606 technical data

|                        |                                   |       |
|------------------------|-----------------------------------|-------|
| Density                | g/cm <sup>3</sup>                 | 1,76  |
| Hardness               | shore                             | 83    |
| Flexural strength      | psi                               | 14,50 |
| Compression            | psi                               | 22,10 |
| Electric resistivity   | $\mu$ ohm-in                      | 850   |
| Thermal conductivity   | Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>  | n.a.  |
| C.T.E.                 | $\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ | 9,10  |
| Elasticity             | MPa                               | n.a.  |
| Av. medium grain size  | $\mu\text{m}$                     | <1    |
| Av. maximum grain size | $\mu\text{m}$                     | n.a.  |
| Ash content            | ppm                               | 3000  |
| Porosity               | %                                 | n.a.  |

*Figura 3.13 datasheet grafite utilizzata per gli inserti dei pattini*



*Figura 3.14 pattino pneumostatico poroso corpo in alluminio, sulla destra particolare dell'inserto montato*



*Figura 3.15 pattino pneumostatico poroso corpo pla ottenuto tramite stampa 3D, sulla destra particolare dell'inserto montato*

### 3.4 Risultati prove di permeabilità

In seguito, vengono esposti i risultati ottenuti dalle prove di permeabilità degli inserti di dimensioni pari ai pattini. La procedura per la raccolta dei dati e la seguente elaborazione è la medesima utilizzata per i provini cilindrici presentata nel capitolo precedente. Gli inserti testati sono il P1 avente superfici piane e il P2 caratterizzato dai canali per distribuzione dell'aria. Si ripone la possibilità di eseguire altre prove sui pattini a seguito di una lappatura delle superficie porosa, in figura 3.16 viene riportato il profilo di un pattino misurato con profilometro.

In figura 3.17-A vengono riportati i valori medi della permeabilità, per il pattino P1 la permeabilità media aumenta all'aumentare della pressione di alimentazione, lo stesso non può essere affermato per il provino P2. È possibile dedurre dai valori della permeabilità a differenza di pressione massima figura 3.17-B che i canali per la distribuzione dell'aria presenti nell'inserto P2 non influenzano in maniera significativa la permeabilità; tuttavia, è presente una differenza tra i due inserti e in questo caso la permeabilità diminuisce all'aumentare della pressione di alimentazione. In aggiunta, i risultati ottenuti permettono di concludere che la grafite fornita ha dei valori molto bassi, considerando che la permeabilità per pattini pneumostatici porosi deve aggirarsi tra  $1 \times 10^{-16}$  e  $1 \times 10^{-14}$  m<sup>2</sup> [13]. In figura 3.18-3.20 vengono riportati i valori sperimentali della permeabilità.

In figura 3.21 viene riportato il valore del coefficiente inerziale calcolato a portata massima. Nella figura 3.22-3.24 vengono riportati i valori sperimentali del numero di Reynolds ed il fattore di attrito questi non hanno un andamento diverso rispetto a quanto già visto nel capitolo precedente, si evidenzia però il comportamento diverso a pressioni di alimentazione differenti. Infine, in figura 3.25-3.26 vengono riportati i valori della portata massica sperimentale e di quella teorica ottenuta con il modello di Forchheimer, si conferma la validità del modello per lo studio della portata. Si nota come data la porosità nettamente inferiore rispetto ai provini testati in precedenza e nonostante una superficie di passaggio dell'aria circa venti volte maggiore, la portata passante è di un ordine di grandezza più piccola. In figura 3.27 si può osservare come la presenza delle cave dell'inserto del pattino P2 aumenti di poco la portata passante rispetto all'inserto piano del pattino P1.

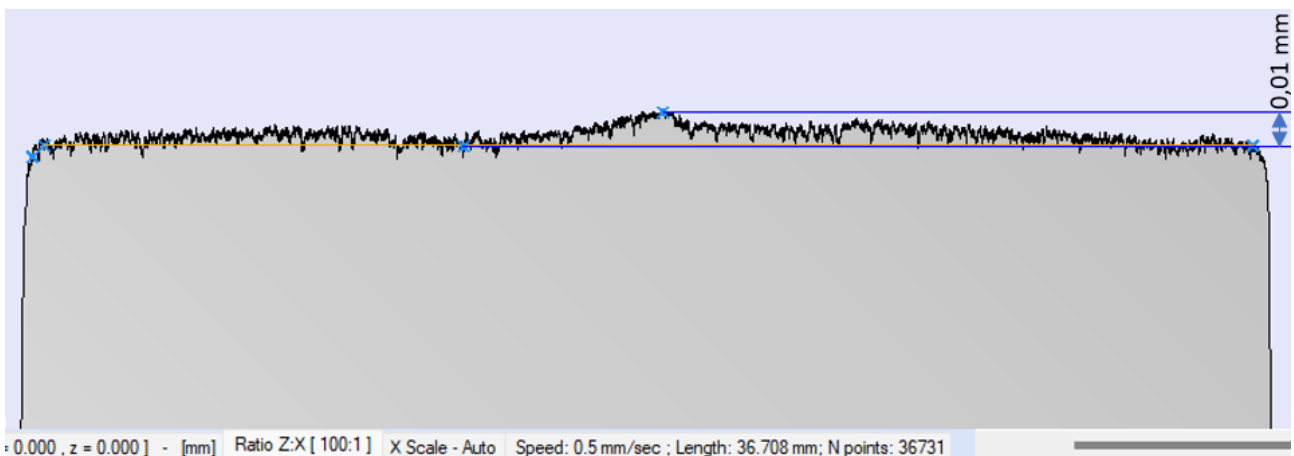


Figura 3.16 profilo inserto pattino P1 scala 100/1 tolleranza parallelismo 10 μm

| K media [m <sup>2</sup> ] | 4 bar                  | 5 bar                  | 6 bar                  |
|---------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| P1                        | 4,1*10 <sup>-16</sup>  | 3,96*10 <sup>-16</sup> | 3,6*10 <sup>-16</sup>  |
| P2                        | 4,36*10 <sup>-16</sup> | 5,33*10 <sup>-16</sup> | 5,19*10 <sup>-16</sup> |

3.17 (A)

| K finale [m <sup>2</sup> ] | 4 bar                  | 5 bar                  | 6 bar                  |
|----------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| P1                         | 4,31*10 <sup>-16</sup> | 4,19*10 <sup>-16</sup> | 3,96*10 <sup>-16</sup> |
| P2                         | 4,69*10 <sup>-16</sup> | 4,53*10 <sup>-16</sup> | 4,34*10 <sup>-16</sup> |

3.17 (B)

Figura 3.17 (A) valore medio permeabilità per i primi 10 valori a velocità più bassa. (B) valore permeabilità a differenza di pressione massima

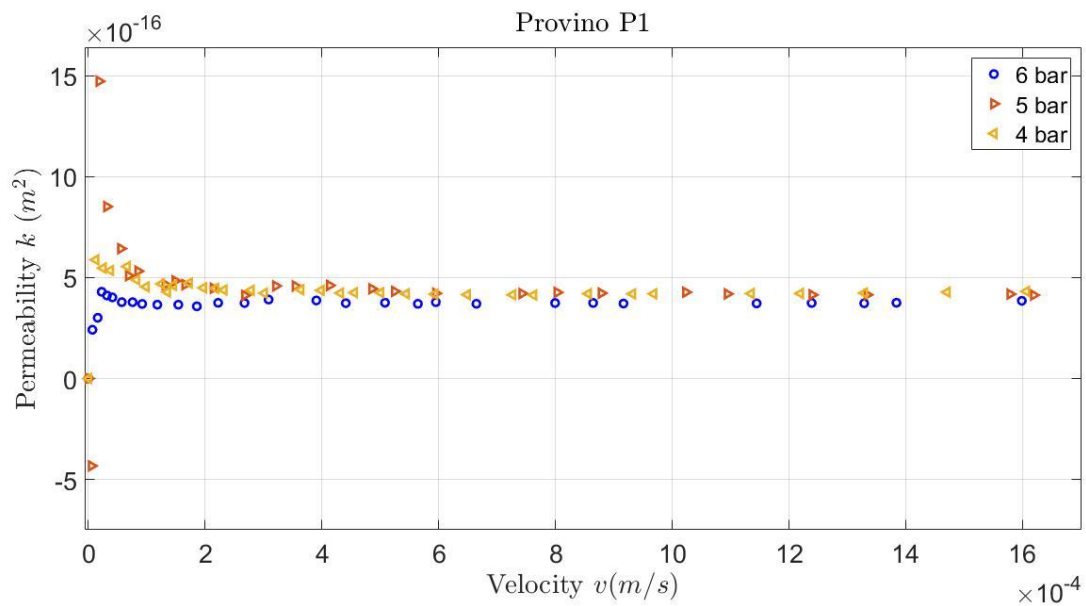


Figura 3.18 grafico riportanti l'andamento delle permeabilità per provino in basse alla velocità del flusso che lo attraversa

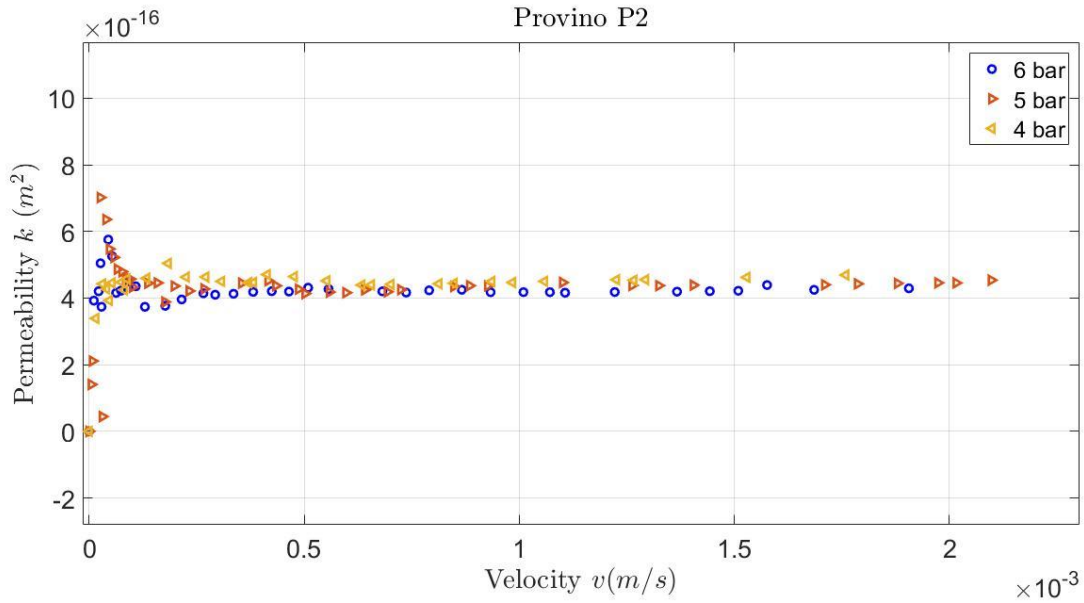


Figura 3.19 grafico riportanti l'andamento delle permeabilità per provino in basse alla velocità del flusso che lo attraversa

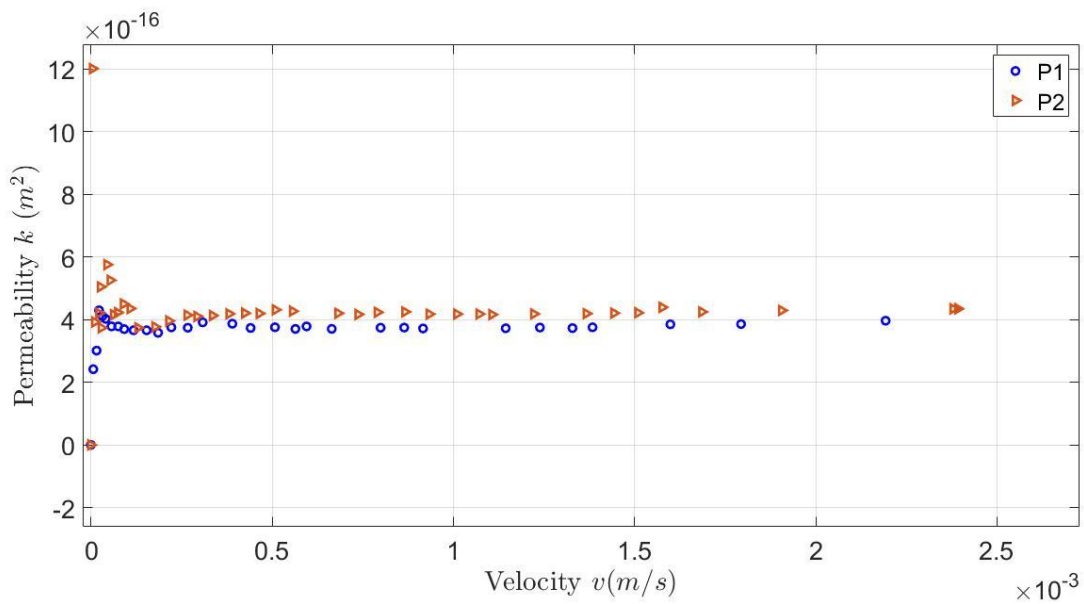


Figura 3.20 grafico riportanti l'andamento delle permeabilità per entrambi i provini in basse alla velocità del flusso che lo attraversa

| c  | 4 bar              | 5 bar              | 6 bar              |
|----|--------------------|--------------------|--------------------|
| P1 | $2.04 \cdot 10^4$  | $-6.16 \cdot 10^3$ | $-7.42 \cdot 10^3$ |
| P2 | $-9.48 \cdot 10^3$ | $1.58 \cdot 10^4$  | $1.36 \cdot 10^4$  |

Figura 3.21 coefficiente inerziale valutato nel punto con rapporto di pressione P2/P1 minore

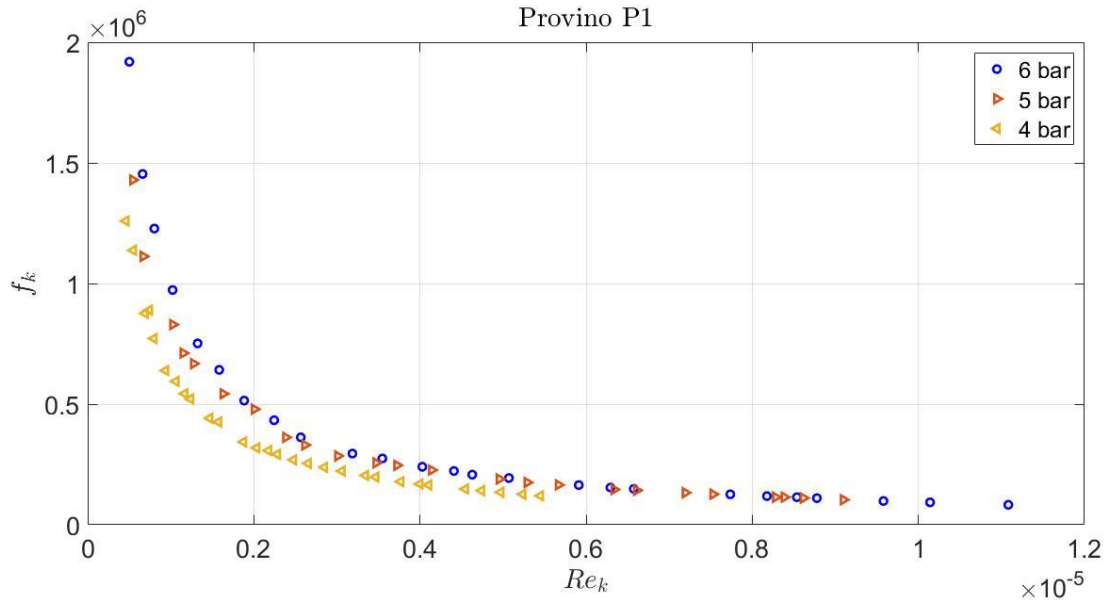


Figura 3.22 valori di  $Re$  e  $f_k$  diagrammati per inserto P1 a pressioni di alimentazione differenti

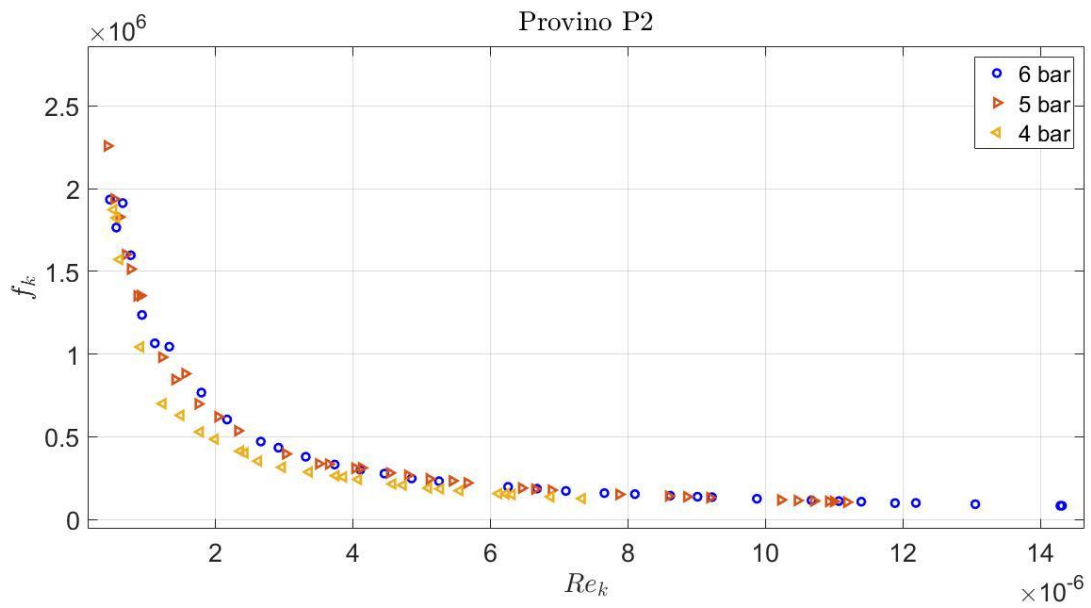


Figura 3.23 valori di  $Re$  e  $f_k$  diagrammati per provino P2 a pressioni di alimentazione differenti

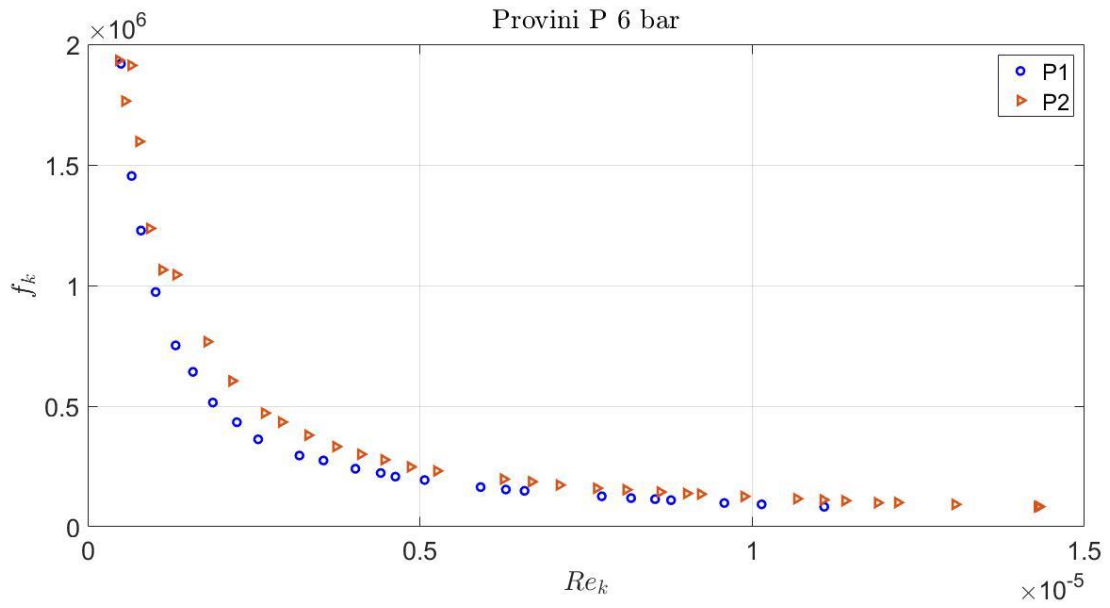


Figura 3.24 confronto valori di  $Re$  e  $f_k$  diagrammati per pressione di alimentazione a 6 bar

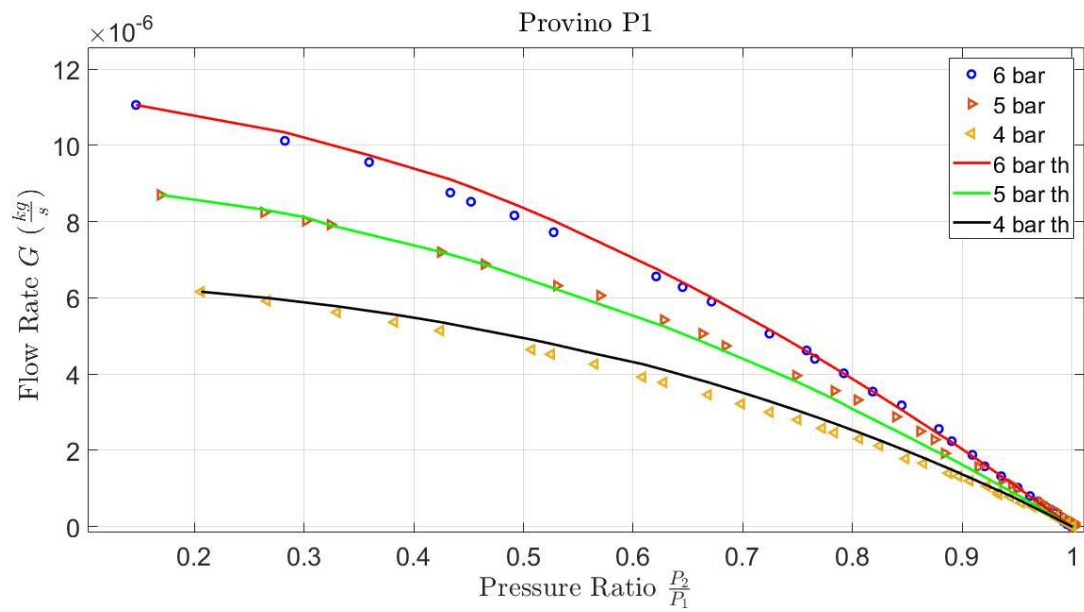


Figura 3.25 valori della portata sperimentale e di quella teorica diagrammati per provino P1 a 3 pressioni di alimentazione differenti

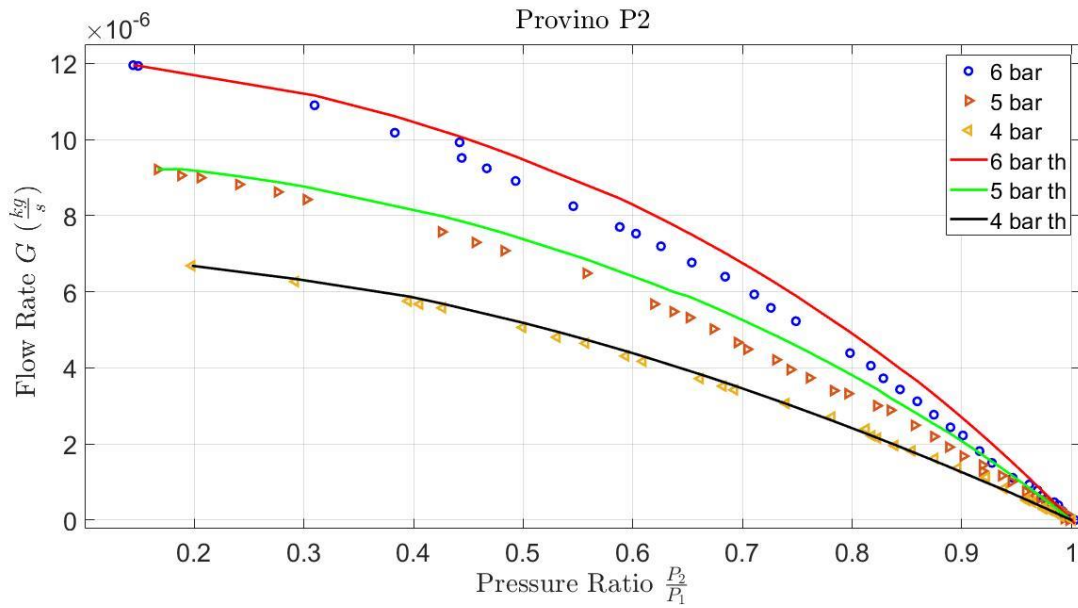


Figura 3.26 valori della portata sperimentale e di quella teorica diagrammati per provino P2 a 3 pressioni di alimentazione differenti

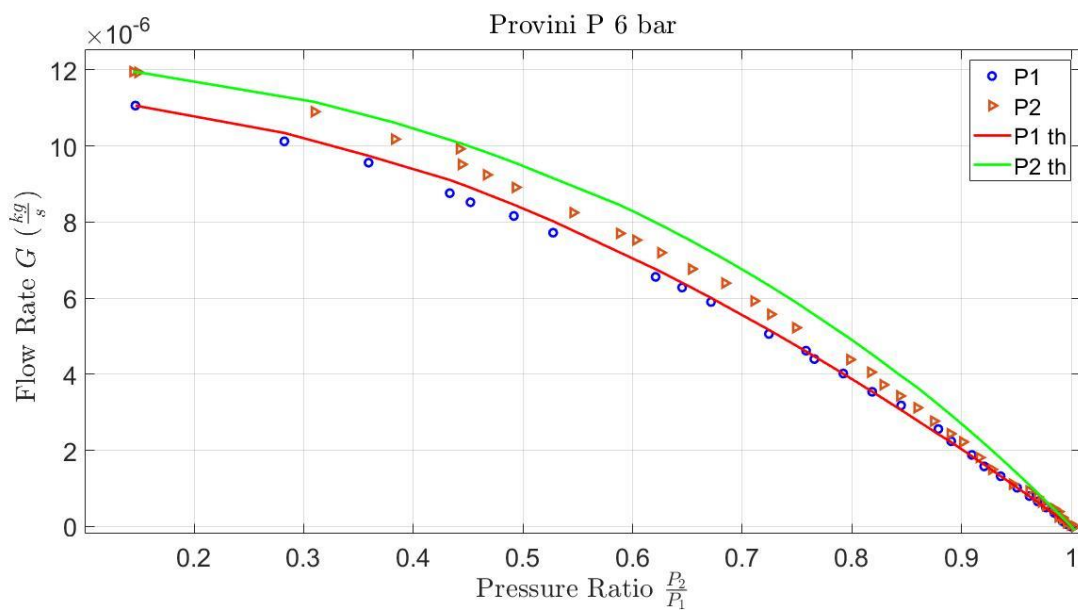


Figura 3.27 valori della portata sperimentale e di quella teorica diagrammati per provino P1 e P2 a 6 bar relativi



Il banco per la misura della permeabilità si è rilevato funzionante come anche la manifattura dei pattini che non si sono scollati una volta mandati in pressione. I dati sperimentali ottenuti hanno gli stessi andamenti dei provini in grafite testati nel banco precedente. Viene proposto in figura 3.28-3.30 il confronto tra le curve teoriche di portata usando la legge di Forchheimer e la legge di Darcy utilizzando però la permeabilità a differenza di pressione massima figura 3.17 B. Come si osserva, al contrario di figura 2.25 dove le due leggi restituiscono degli andamenti della portata teorica differente, utilizzando nella legge di Darcy ed il valore di permeabilità calcolato con la differenza di pressione massima le due curve di portata teorica sono molto simili. Questo significa che la sola legge di Darcy funziona bene quando la permeabilità è molto bassa, per permeabilità più alte la migliore approssimazione è data dalla legge di Forchheimer.

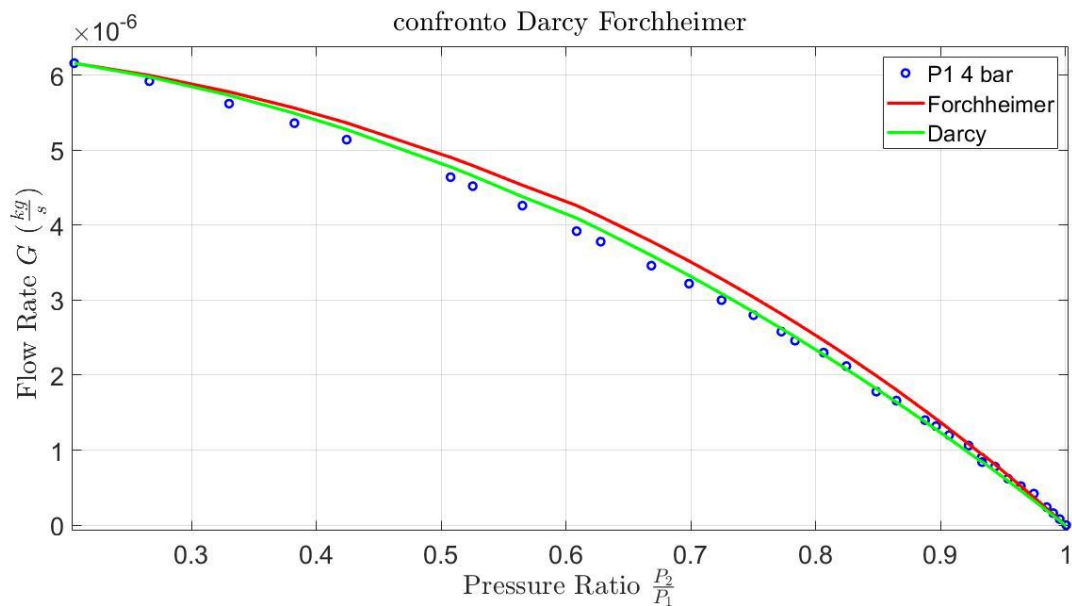


Figura 3.28 valori della portata sperimentale e di quella teorica diagrammati per provino P1 a 4 bar mettendo a confronto modello di Darcy con quello di Forchheimer

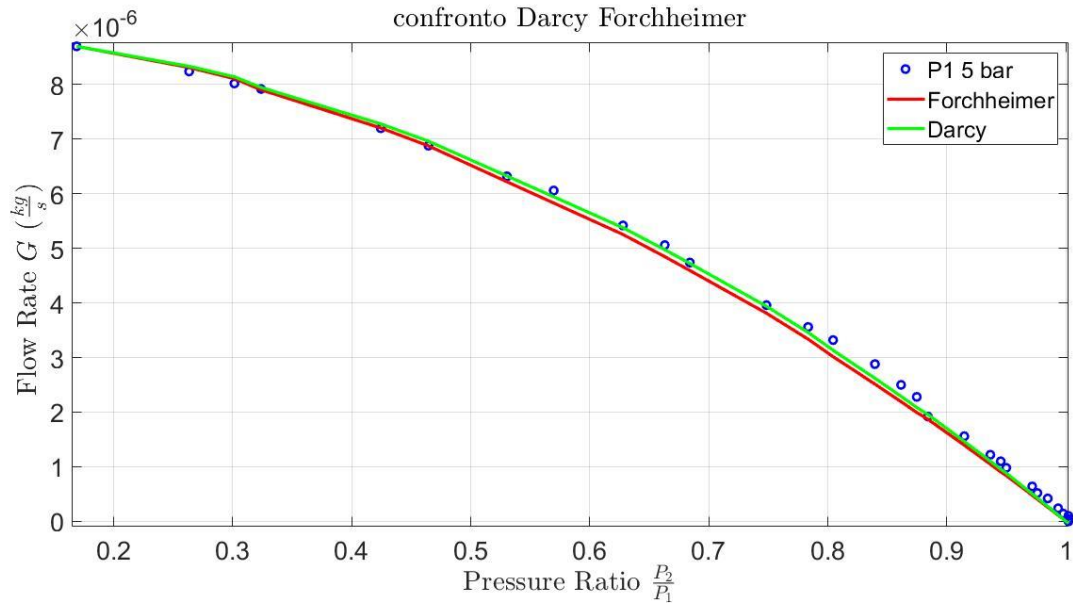


Figura 3.29 valori della portata sperimentale e di quella teorica diagrammati per provino P1 a 5 bar mettendo a confronto modello di Darcy con quello di Forchheimer

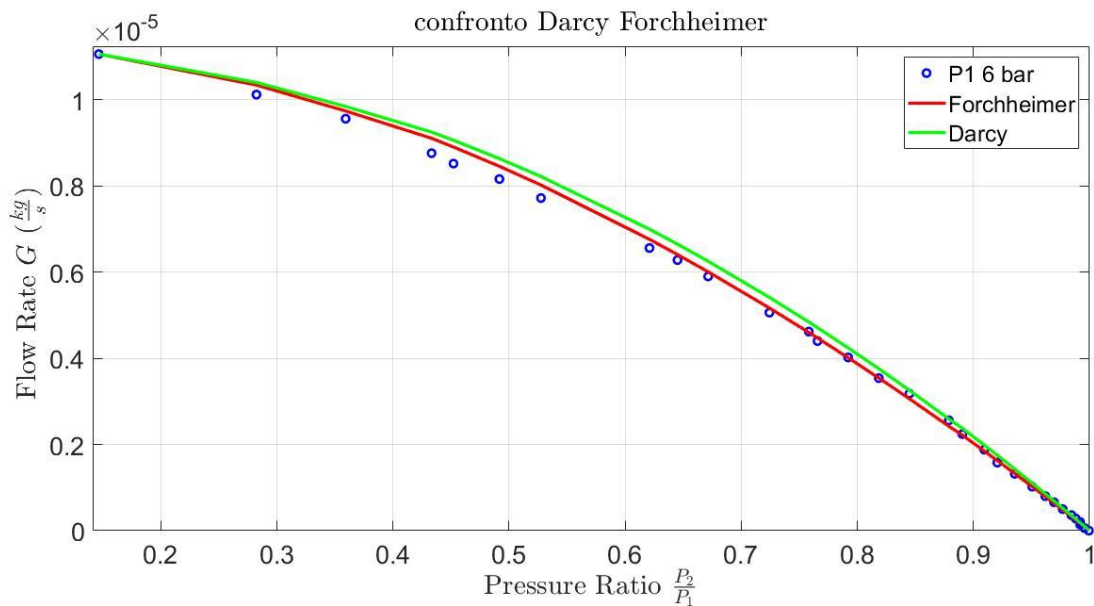


Figura 3.30 valori della portata sperimentale e di quella teorica diagrammati per provino P1 a 6 bar mettendo a confronto modello di Darcy con quello di Forchheimer

# Capitolo 4

## 4.1 Modello pattino pneumostatico poroso

La conclusione di questo lavoro di tesi prevede la costruzione di un modello matematico con il fine di simulare le caratteristiche statiche di un pattino pneumostatico poroso circolare. Il modello una volta verificato con i valori sperimentali, consente di essere usato per predire le specifiche e la dipendenza dei parametri di un pattino poroso. I valori numerici ottenuti sono stati confrontati con i valori sperimentali eseguiti su un pattino della NEW WAY diametro 65 mm (modello S106501), purtroppo non è stato possibile eseguire un confronto con i pattini costruiti per il banco di permeabilità, in quanto la superficie attiva del pattino non ha una tolleranza di planarità adeguata.

## 4.2 Equazione di Reynolds

L'equazione di Reynolds rappresenta una semplificazione dell'equazione di Navier-Stokes. Da un punto di vista fisico, l'equazione di Navier-Stokes descrivere la dinamica di un elemento fluido di volume infinitesimo sulla base della legge di conservazione della quantità di moto (la variazione della quantità di moto dell'elemento fluido è dovuta alle forze esterne che agiscono sull'elemento stesso). L'equazione di Reynolds può essere ottenuta a partire dalle equazioni di Navier-Stokes sotto le seguenti ipotesi:

1. Forze di volume trascurabili (inerzia e gravità)
2. Flusso laminare
3. Sforzi viscosi espressi da eq. 14
4. Che l'altezza del meato  $h$  sia molto più piccola del raggio del pattino

Alla luce dell'ipotesi 4 e della figura 67, si avrà quindi che:

- La pressione  $p$  e la viscosità  $\mu$  potranno essere considerate costanti lungo l'altezza del meato:

$$\mu = \mu(r, \theta); p = p(r, \theta) \quad \text{Eq. 3.1}$$

- I gradienti di velocità lungo le direzioni  $r$  ed  $\theta$  risulteranno essere trascurabili rispetto a quelli lungo l'altezza del meato

$$\partial(\cdot)/\partial r, \partial(\cdot)/\partial \theta \ll \partial(\cdot)/\partial z \quad \text{Eq. 3.2}$$

All'interno del meato vengono a crearsi degli sforzi tangenziali che si oppongono al flusso d'aria, dipendenti dalla viscosità del fluido. Considerando il sistema riportato in figura 4.1, per motivi di adesione lo strato di fluido a contatto con il piano superiore e inferiore sono fermi. Visti i valori del numero di Reynold trovati nelle prove precedenti si può affermare che il flusso è laminare.  $u$  è il valore della velocità dello strato di fluido generico alla coordinata  $z$ . Per effetto della viscosità, perché ciascuno strato possa avanzare, è necessaria una pressione  $p(r)$ . Vista eq. 3.2 la forza tangenziale per unità di area che si crea tra gli strati di fluido  $\tau$  viene descritta da eq. 3.3.

$$\begin{aligned} \tau_{\theta r} &= \mu \left( \frac{\partial u_{\theta}}{\partial r} + \frac{\partial u_r}{\partial \theta} \right) \approx 0 & \text{Eq. 3.3} \\ \tau_{\theta z} &= \mu \left( \frac{\partial u_{\theta}}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial \theta} \right) \approx \mu \frac{\partial u_{\theta}}{\partial z} \\ \tau_{rz} &= \mu \left( \frac{\partial u_r}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial r} \right) \approx \mu \frac{\partial u_r}{\partial z} \end{aligned}$$

Per poter ricavare l'equazione di Reynold è necessaria l'espressione del profilo di velocità  $u(z)$ . Tale espressione può essere ottenuta partendo dalle condizioni di equilibrio di un volume infinitesimo nel meato eq. 3.4, come mostrato in figura 4.1. Unendo eq. 3.3 con eq. 3.4 si ottiene l'eq. 3.5 che integrata due volte restituisce l'espressione del profilo di velocità eq. 3.6. La portata volumica di aria per unità di lunghezza ( $r d\theta$  lungo  $r$ ,  $dr$  lungo  $\theta$ ) può essere ricavata da eq. 3.7 per la portata massica si fa riferimento ad eq. 3.8. Risulta infine possibile scrivere l'equazione di Reynolds eq. 3.9 facendo riferimento alla figura 4.2, dove vengono mostrate le portate passanti attraverso un elemento di fluido.

$$(r) \quad - \left( p_r + \frac{\partial p_r}{\partial r} dr \right) r d\theta dz + p r d\theta dz - \tau_{zr} r d\theta dr + \left( \tau_{zr} + \frac{\partial \tau_{zr}}{\partial z} dz \right) r d\theta dr = 0 \quad \text{Eq. 3.4}$$

$$(\theta) \quad - \left( p_{\theta} + \frac{\partial p_{\theta}}{\partial \theta} d \right) dr dz + p_{\theta} dr dz - \tau_{z\theta} r d\theta dr + \left( \tau_{z\theta} + \frac{\partial \tau_{z\theta}}{\partial z} dz \right) r d\theta dr = 0$$

$$(r) \quad \frac{\partial p_r}{\partial r} = \mu \frac{\partial^2 u_r}{\partial z^2} \quad \text{Eq. 3.5}$$

$$(\theta) \quad \frac{1}{r} \frac{\partial p_{\theta}}{\partial \theta} = \mu \frac{\partial^2 u_{\theta}}{\partial z^2}$$

$$(r) \quad \frac{\partial u_r(z)}{\partial z} = \frac{1}{\mu} \frac{\partial p_r}{\partial r} z + C_1$$

$$(\theta) \quad \frac{\partial u_{\theta}(z)}{\partial z} = \frac{1}{\mu r} \frac{\partial p_{\theta}}{\partial \theta} z + C_2$$

$$(r) \quad u_r(z) = \frac{1}{\mu} \frac{\partial p_r}{\partial r} \frac{z^2}{2} + C_1 z + C_3$$

$$(\theta) \quad u_\theta(z) = \frac{1}{\mu r} \frac{\partial p_\theta}{\partial r} \frac{z^2}{2} + C_2 z + C_4$$

$$(r) \quad u_r(0) = 0$$

$$u_r(h) = 0$$

$$(\theta) \quad u_\theta(0) = 0$$

$$u_\theta(h) = 0$$

$$(r) \quad C_1 = -\frac{\partial p_r}{\partial r} \frac{h}{2\mu}$$

$$C_3 = 0$$

$$(\theta) \quad C_2 = -\frac{\partial p_\theta}{\partial \theta} \frac{h}{2\mu r}$$

$$C_4 = 0$$

$$(r) \quad u_r(z) = \frac{1}{\mu} \frac{\partial p_r}{\partial r} \frac{z^2}{2} - \frac{\partial p_r}{\partial r} \frac{h}{2\mu} z$$

Eq.  
3.6

$$(\theta) \quad u_\theta(z) = \frac{1}{\mu r} \frac{\partial p_\theta}{\partial r} \frac{z^2}{2} - \frac{\partial p_\theta}{\partial \theta} \frac{h}{2\mu r} z$$

$$q_r = \int_0^h u_r(z) dz = -\frac{h^3}{12\mu} \frac{\partial p_r}{\partial r}$$

Eq.  
3.7

$$q_\theta = \int_0^h u_\theta(z) dz = -\frac{h^3}{12\mu r} \frac{\partial p_\theta}{\partial \theta}$$

$$g_r = \rho \int_0^h u_r(z) dz - \frac{\rho h^3}{12\mu} \frac{\partial p_r}{\partial r} = -\frac{\rho h^3}{12\mu RT} \frac{\partial p_r}{\partial r}$$

Eq.  
3.8

$$g_\theta = \rho \int_0^h u_\theta(z) dz = -\frac{\rho h^3}{12\mu r} \frac{\partial p_\theta}{\partial \theta} = -\frac{\rho h^3}{12\mu RT r} \frac{\partial p_\theta}{\partial \theta}$$

$$\rho q_{in} dr d\theta + \rho q_r r d\theta - \left( \rho q_r + \frac{\partial \rho q_r}{\partial r} dr \right) r d\theta + \rho q_\theta dr - \left( \rho q_\theta + \frac{\partial \rho q_\theta}{\partial \theta} d\theta \right) dr = \frac{dm}{dt} \quad \text{Eq. 3.9}$$

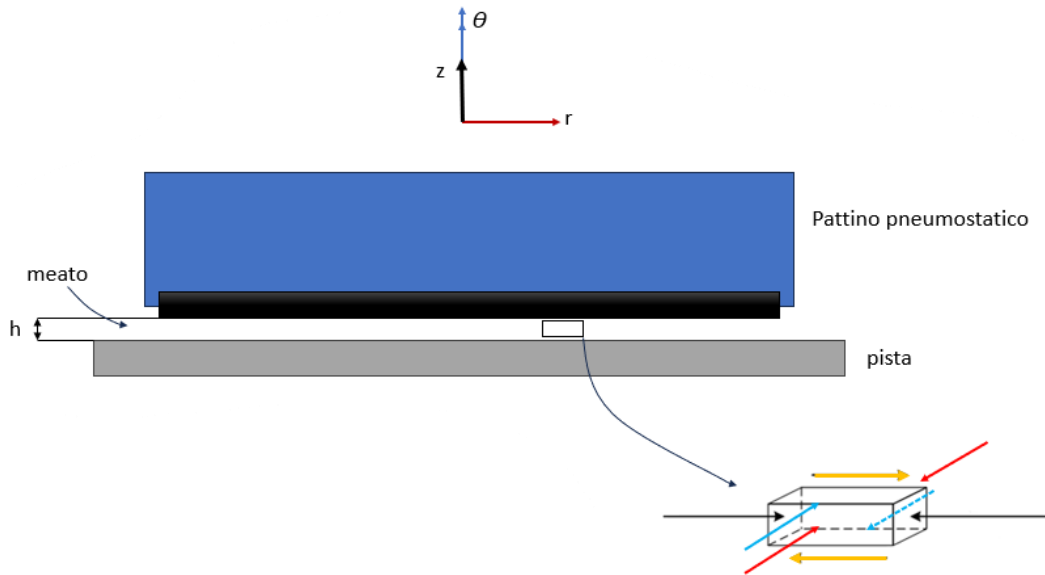


Figura 4.1 schema pattino pneumostatico ed elemento di fluido con tensore degli sforzi

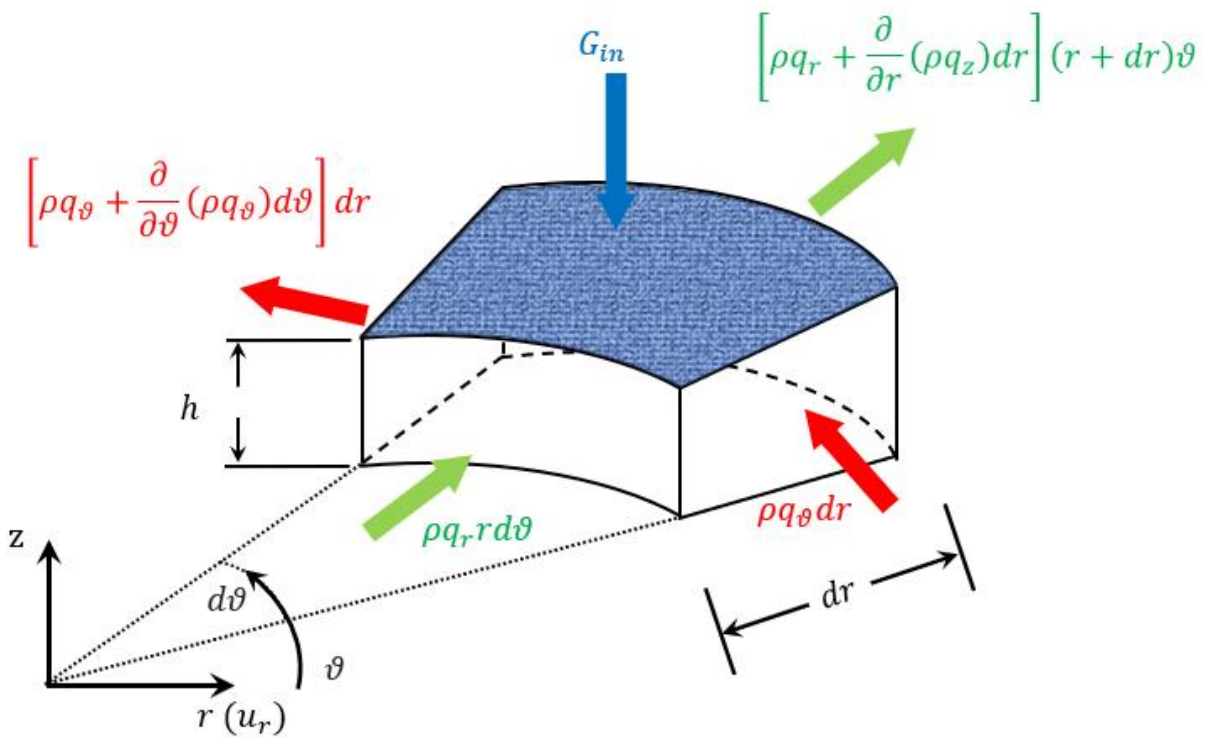


Figura 4.2 elemento di fluido nel meato del pattino con equilibrio delle portate

### 4.3 Discretizzazione alle differenze finite

Per l'implementazione del modello del pattino nel codice MATLAB questo è stato discretizzato mediante differenze finite. Per creare la griglia computazionale è stata divisa la superficie del pattino come mostrato in figura 4.3. Da questa è stato possibile creare la matrice in figura 4.4. Prendendo un generico elemento di fluido figura 4.5, è stato possibile riscrivere l'equazione di Reynold alle differenze finite in condizioni isoterme eq. 3.10.

$$\begin{aligned}
 g_{r_{i,j-\frac{1}{2}}} &= -\frac{p_{i,j-\frac{1}{2}} h_{i,j-\frac{1}{2}}^3}{12 \mu R_g T} \frac{\partial p}{\partial r} \Big|_{i,j-\frac{1}{2}} \\
 g_{r_{i,j+\frac{1}{2}}} &= -\frac{p_{i,j+\frac{1}{2}} h_{i,j+\frac{1}{2}}^3}{12 \mu R_g T} \frac{\partial p}{\partial r} \Big|_{i,j+\frac{1}{2}} \\
 g_{\vartheta_{i-\frac{1}{2},j}} &= -\frac{p_{i-\frac{1}{2},j} h_{i-\frac{1}{2},j}^3}{12 \mu R_g T r_{i-\frac{1}{2},j}} \frac{\partial p}{\partial \vartheta} \Big|_{i-\frac{1}{2},j} \\
 g_{\vartheta_{i+\frac{1}{2},j}} &= -\frac{p_{i+\frac{1}{2},j} h_{i+\frac{1}{2},j}^3}{12 \mu R_g T r_{i+\frac{1}{2},j}} \frac{\partial p}{\partial \vartheta} \Big|_{i+\frac{1}{2},j} \\
 g_E &= \frac{(p_{i-1,j} h_{i-1,j}^3 + p_{i,j} h_{i,j}^3)(p_{i,j} - p_{i-1,j})}{12 \mu R_g T (r_{i-1,j} + r_{i,j}) \Delta \theta} \\
 g_W &= \frac{(p_{i+1,j} h_{i+1,j}^3 + p_{i,j} h_{i,j}^3)(p_{i+1,j} - p_{i,j})}{12 \mu R_g T (r_{i+1,j} + r_{i,j}) \Delta \theta} \\
 g_N &= \frac{(p_{i,j-1} h_{i,j-1}^3 + p_{i,j} h_{i,j}^3)(p_{i,j} - p_{i,j-1})}{24 \mu R_g T \Delta r} \\
 g_S &= \frac{(p_{i,j+1} h_{i,j+1}^3 + p_{i,j} h_{i,j}^3)(p_{i,j+1} - p_{i,j})}{24 \mu R_g T \Delta r} \\
 G_{in} + (g_W - g_E) \Delta r + (g_N - g_S) r_{i,j} \Delta \theta &= \frac{\Delta m}{\Delta t} \\
 \frac{\Delta m}{\Delta t} = \frac{\Delta \rho V}{\Delta t} = \frac{\Delta}{\Delta t} \left( \frac{pV}{RT} \right) &= \frac{\Delta p}{\Delta t} \frac{hA}{RT} + \frac{\Delta h}{\Delta t} \frac{pA}{RT} \\
 G_{in} + (g_W - g_E) \Delta r + (g_S - g_N) r_{i,j} \Delta \theta &= \frac{\Delta p}{\Delta t} \frac{hA}{RT} + \frac{\Delta h}{\Delta t} \frac{pA}{RT}
 \end{aligned}$$

Eq. 3.10

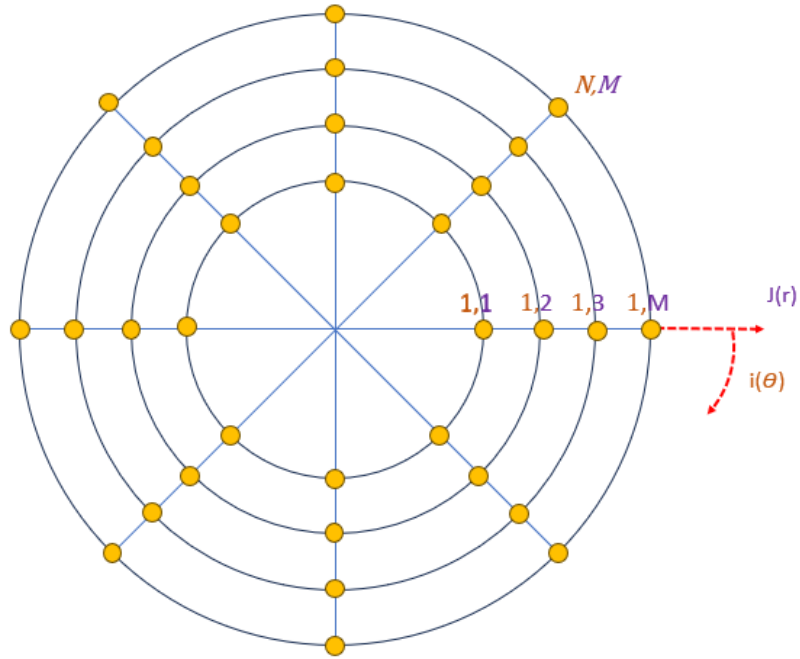


Figura 4.3 struttura griglia differenze finite pattino

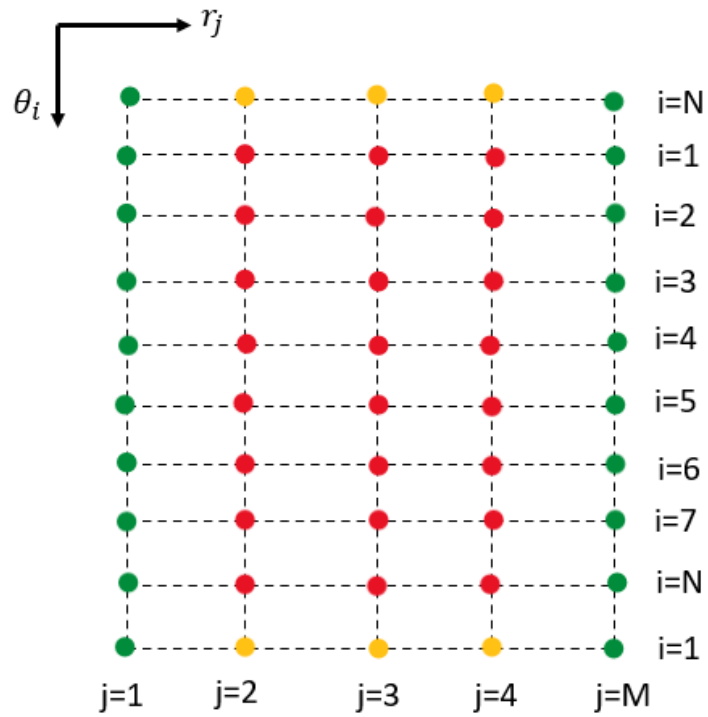


Figura 4.4 matrice computazionale, verde nodi esterni, rosso nodi interni, giallo nodi ripetuti



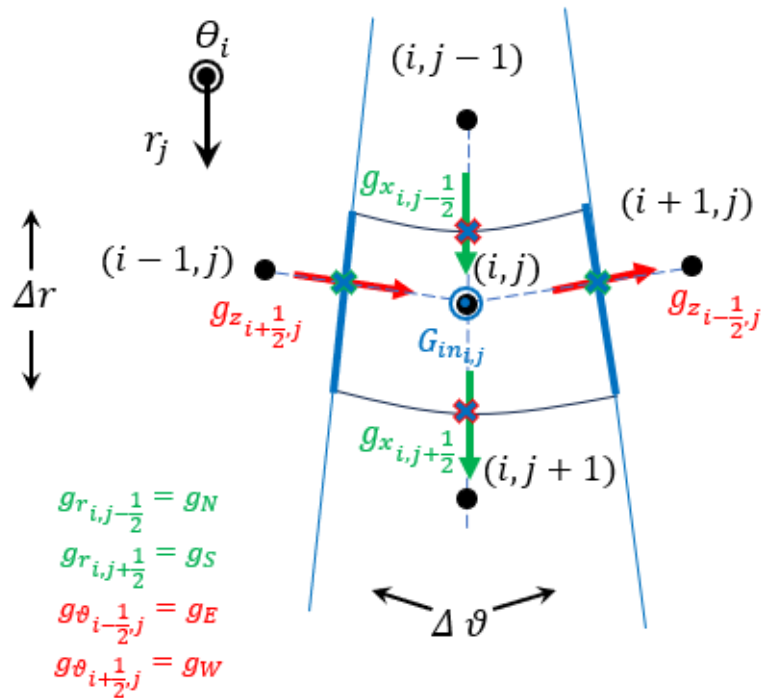


Figura 4.5 generico elemento di fluido con parametri di cella

#### 4.4 Portata inserto poroso $G_{in}$

Per il calcolo della portata in ingresso dall'inserto poroso è stata usata la legge di Darcy eq. 3.11, questo perché i valori numerici ottenuti dal modello sono stati confrontati con un pattino della NEW WAY diametro 65 mm (modello S106501), di cui è nota esclusivamente la permeabilità a getto libero. Seguendo i passaggi già visti per il calcolo della permeabilità di inserti porosi cilindrici si arriva all'eq. 3.13. Questo risultato approssima l'area di passaggio del fluido figura 4.6 attraverso l'inserto poroso pari ad un rettangolo eq. 3.12.

| Simbolo    | Descrizione                    | Unità di misura    |
|------------|--------------------------------|--------------------|
| m          | Massa                          | kg                 |
| L          | Lunghezza provino              | m                  |
| p          | Pressione assoluta monte       | Pa                 |
| $\Delta p$ | P1-P2                          | Pa                 |
| Q          | Portata volumica               | l/min              |
| A          | Area passaggio aria inserto    | m <sup>2</sup>     |
| R          | Costante gas                   | J/kg*k             |
| T          | Temperatura ambiente           | k                  |
| $\rho_a$   | Densità aria                   | Kg/ m <sup>3</sup> |
| $\rho_m$   | Densità aria media nel provino | Kg/ m <sup>3</sup> |
| v          | velocità                       | m/s                |
| K          | permeabilità                   | m <sup>2</sup>     |

$$\frac{dp}{dz} = \frac{\mu v}{K} \quad \text{Eq. 3.11}$$

$$v = \frac{G}{\rho A}$$

$$\rho = \frac{p}{RT}$$

$$G = Q \rho_a$$

$$G = \frac{\rho_m k A dp}{\mu dz}$$

$$\int_{z_1}^{z_2} G dz = \int_{p_s}^{p_2} \frac{\rho k A}{\mu} dp$$

$$A_{i,j} = \Delta\theta r_{i,j} \Delta r \text{ approssimato rettangolo} \quad \text{Eq. 3.12}$$

$$G_{in i,j} = \frac{(p_s^2 - p_{i,j}^2) K A_{i,j}}{L \mu 2 R T} \quad \text{eq. 3.13}$$

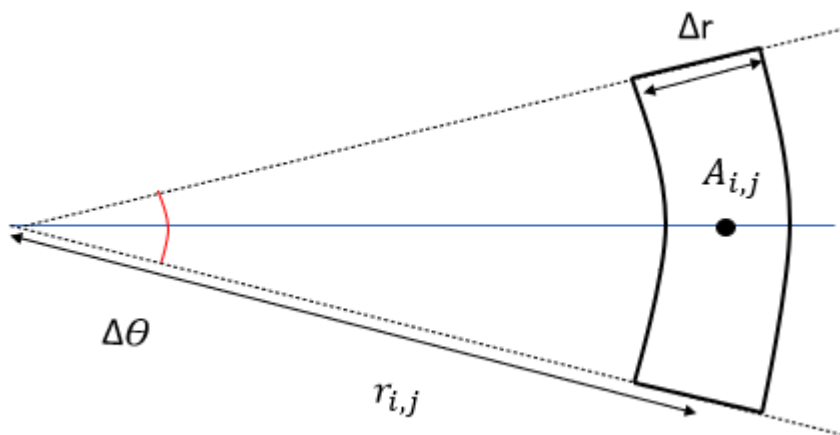


Figura 4.6 area passaggio  $G_{in}$  attraverso inserto poroso

## 4.5 Condizioni al contorno

Per la risoluzione del modello sono state fissate delle condizioni sul bordo di Dirichlet. Nello specifico l'equazione di Reynold eq. 3.10 è stata riformulata per poter descrivere il profilo di pressione eq. 3.14. Per il bordo interno figura 4.7 ossia la prima colonna della matrice computazionale figura 4.2, la pressione è pari ad un valore  $p_c$  che cambia in funzione della pressione di alimentazione e dell'altezza del meato eq. 3.15, lo stesso valore di pressione è assunto anche su tutta l'area interna assumendo un raggio  $r_{int}$  molto piccolo. Per il bordo esterno la pressione è pari a quella ambiente eq. 3.16.

$$p_{i,j}^{t+1} = p_{i,j}^t + \left[ (G_{in} - G_{out}) - \frac{h_{i,j}^{t+1} - h_{i,j}^t}{\Delta t} \frac{p_{i,j} A}{RT} \right] \frac{RT \Delta t}{h_{i,j} A} \quad \text{eq. 3.14}$$

$$p_{i,1} = p_c$$

$$p_c^{t+1} = p_c^t + \left[ (G_{in} - G_{out}) - \frac{h_{i,1}^{t+1} - h_{i,1}^t}{\Delta t} \frac{p_c A}{RT} \right] \frac{RT \Delta t}{h_{i,j} A} \quad \text{eq. 3.15}$$

$$G_{out} = \frac{(p_c h_{i,1}^3 + p_{i,2} h_{i,2}^3)(p_{i,2} - p_c)}{24 \mu R_g T \Delta r} r_{i,1} \Delta \theta$$

$$G_{in} = \frac{(P_s^2 - P_c^2) K (\pi r_{interno}^2)}{2 L \mu R T N}$$

$$p_{i,N} = p_{ambiente} \quad \text{eq. 3.16}$$

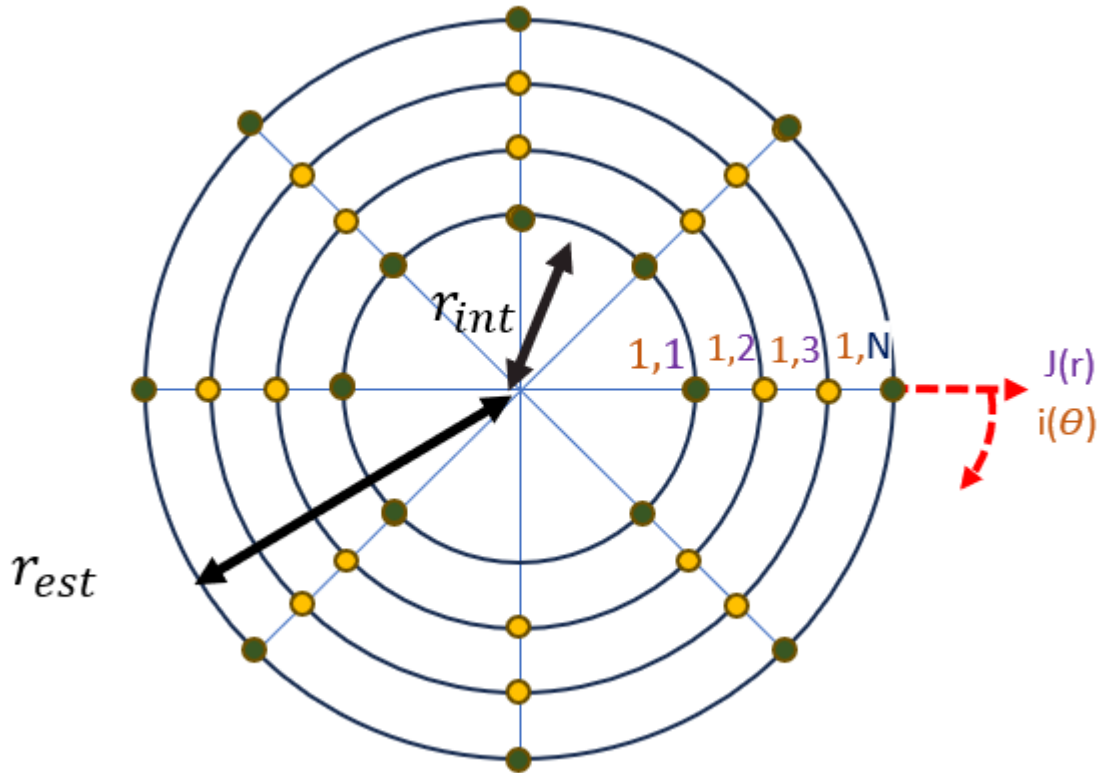


Figura 4.7 griglia modello pattino con evidenziati il verde bordo interno ed il bordo esterno

## 4.6 Identificazione sperimentale permeabilità

Il modello è stato verificato con un pattino della NEW WAY diametro 65 mm (modello S106501). Per poter simulare le caratteristiche di portata e di portanza del pattino è stato necessario rilevare lo spessore dell'inserto poroso e la sua permeabilità. La superficie porosa ha un diametro pari a 63 mm come riportato sulla scheda tecnica del prodotto figura 4.8. La permeabilità e lo spessore dell'inserto sono stati ricavati dalle prove di getto libero del pattino, ossia la misura della portata d'aria che attraversa il pattino con diverse pressioni di alimentazione e una pressione di scarico pari alla pressione ambiente, in figura 4.9 viene mostrato lo schema pneumatico per l'esecuzione della misura. Utilizzando la legge di Darcy e ponendo la differenza di pressione paria alla pressione di alimentazione è stato possibile ottenere figura 4.10, con uno spessore dell'inserto poroso di 6 mm e una permeabilità pari a  $1,25 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$ . Si osserva come i valori teorici della portata sono molto molto simili a quelli sperimentali fino a 3 bar di pressione di alimentazione assoluta, all'aumentare di questa il valore della portata teorica è sempre sotto quella sperimentale.

| SPECIFICATIONS: 65mm #S106501               |   |
|---|---|
| Input Pressure                              | .41 MPa (60psi)   |
| Ideal Load N (lbs)                          | 666 (150)   |
| Stiffness N/micron (lbs/u in) <sup>1</sup>  | 87 (0.50)   |
| Flow NLPM (SCFH) <sup>1</sup>               | 1.4 (2.9)   |
| Fly Height <sup>1</sup>                     | 5 microns   |
| Bearing Size                                | 65mm  |
| Bearing Height mm (in)                      | 20 (0.79)   |
| Bearing Weight grams (oz.)                  | 151 (5.3)   |
| Housing Material/Finish                     | Aluminum/Anodized   |
| Porous Media Material                       | Carbon  |
| Bearing Face Surface Size - Carbon mm (in)  | 63 (2.48) $\phi$  |
| Flatness mm (in)                            | 0.0005 (0.00002)  |
| Ball Socket Size                            | 13mm  |
| Pressure Port Thread                        | M5 X 0.8  |
| Viable Pressure Range                       | .414-.552MPa (60psi - 80psi)  |
| Maximum Allowable Pressure Supply           | .689 MPa (100psi)   |
| Resolution <sup>2</sup>                     | Infinite  |
| Maximum Speed <sup>1</sup>                  | 50m/sec   |
| Common Guide Surfaces                       | Granite, hard-coated aluminum, ceramics, glass, stainless steel, plated steel |
| Suggested Guide Surface Finish <sup>3</sup> | 16 RMS  |

Figura 4.8 scheda tecnica pattino NEW WAY 65 mm

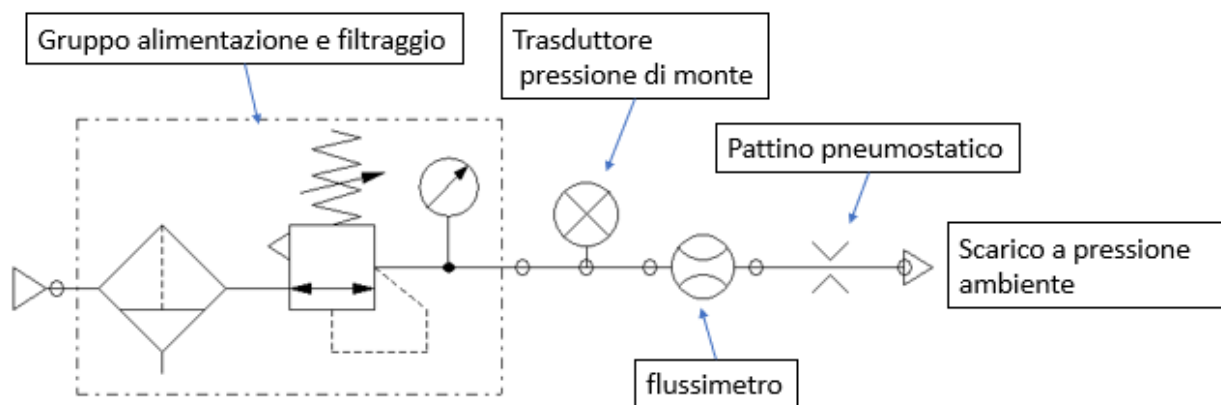


Figura 4.9 Schema pneumatico prova getto libero

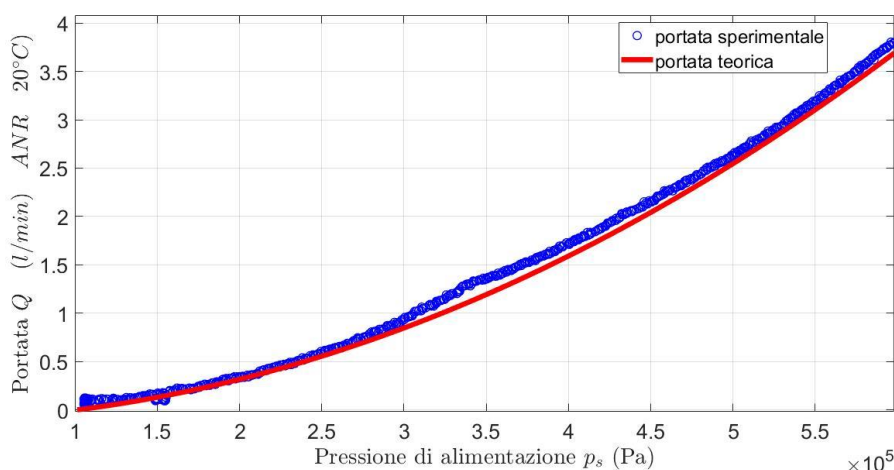


Figura 4.10 valori sperimentali e teorici prova di getto libero,  $p_s$  pressione assoluta

## 4.7 Verifica del modello

In questo paragrafo vengono presentati i risultati ottenuti dal modello del pattino confrontati con i valori sperimentali, nello specifico sono state eseguite quattro simulazioni delle caratteristiche statiche a pressioni di alimentazione differenti, per ciascuna è stato fatto un confronto con i dati sperimentali. In figura 4.11 viene mostrato il consumo d'aria in funzione dell'altezza del meato, si nota la portata abbia un andamento lineare crescente prima di andare in regime sonico. Per meati più alti la pressione di alimentazione influenza la precisione del modello, questo era prevedibile sulla base di quanto già visto nel paragrafo precedente nella determinazione della permeabilità. La simulazione della portanza, figura 4.12 ha restituito dei buoni risultati, l'andamento è simile per tutte le pressioni di alimentazione si ha un andamento relativamente piatto per meati superiori ai 10  $\mu\text{m}$ , a meati inferiori l'andamento è quasi lineare con la portanza che aumenta al diminuire dell'altezza del

meato. Si propone in figura 4.13 e 4.14 la simulazione della rigidezza per le pressioni di esercizio del pattino proposte dal costruttore, nella curva teorica si nota la presenza di un massimo quando il meato è alto circa  $5\ \mu\text{m}$ , ossia il valore di riferimento di lavoro di questo pattino. Nei valori sperimentali al diminuire dell'altezza del meato si nota ad un certo punto la presenza di salti di rigidezza discordi dal modello, questo è dovuto alla collisione del pattino in certi punti della pista dovuto a delle irregolarità sulla superficie di riscontro dell'apparecchiatura di misura o alla presenza di contaminati come la polvere che come già visto ha solitamente delle grandezze intorno ai  $4\ \mu\text{m}$ .

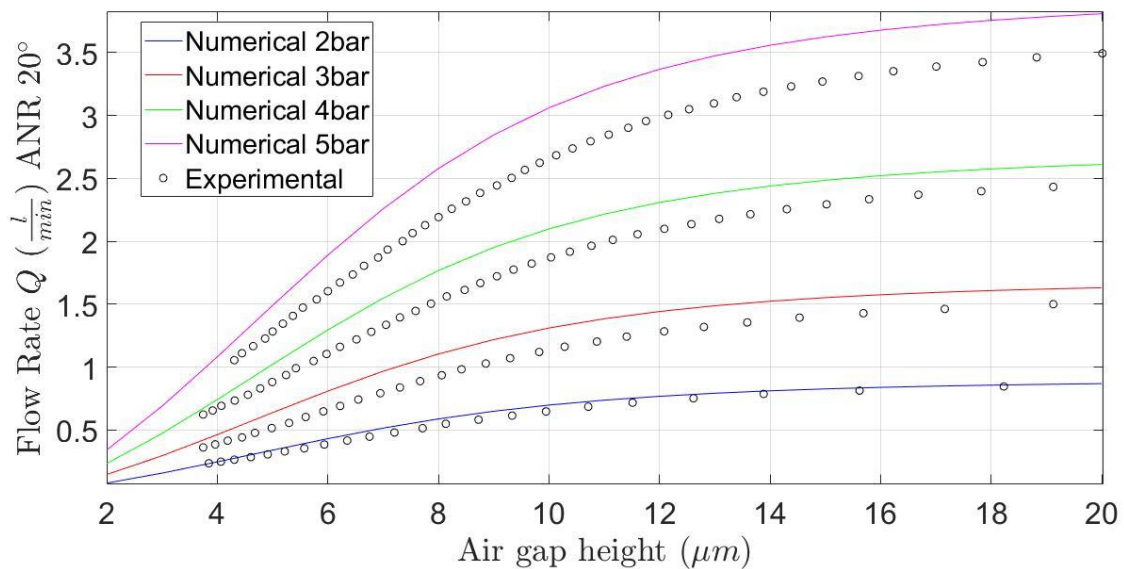


Figura 4.11 Curve di consumo d'aria del pattino NEW WAY 65 mm con pressioni di alimentazione relativa differente

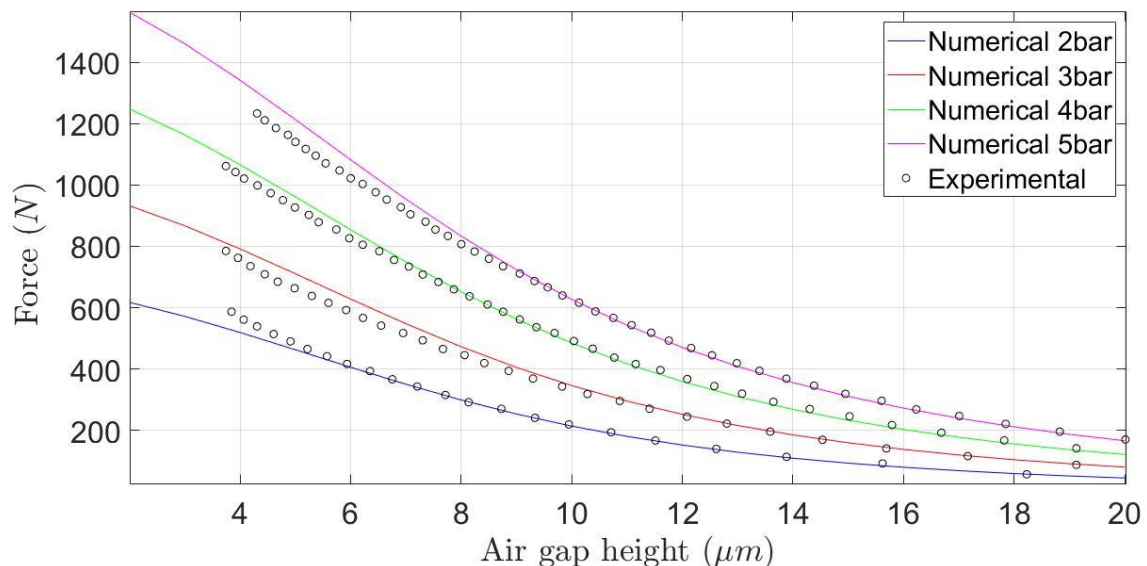


Figura 4.12 Curve di portanza del pattino NEW WAY 65 mm con pressioni di alimentazione relativa differente

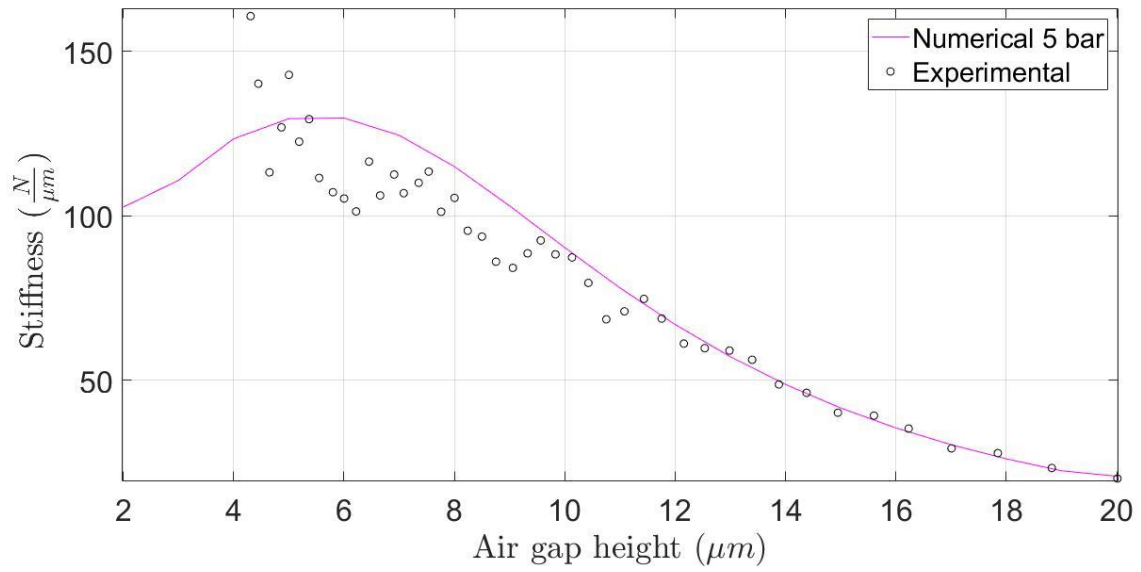


Figura 4.13 Curva di rigidezza del pattino NEW WAY 65 mm con pressione di alimentazione relativa 5 bar

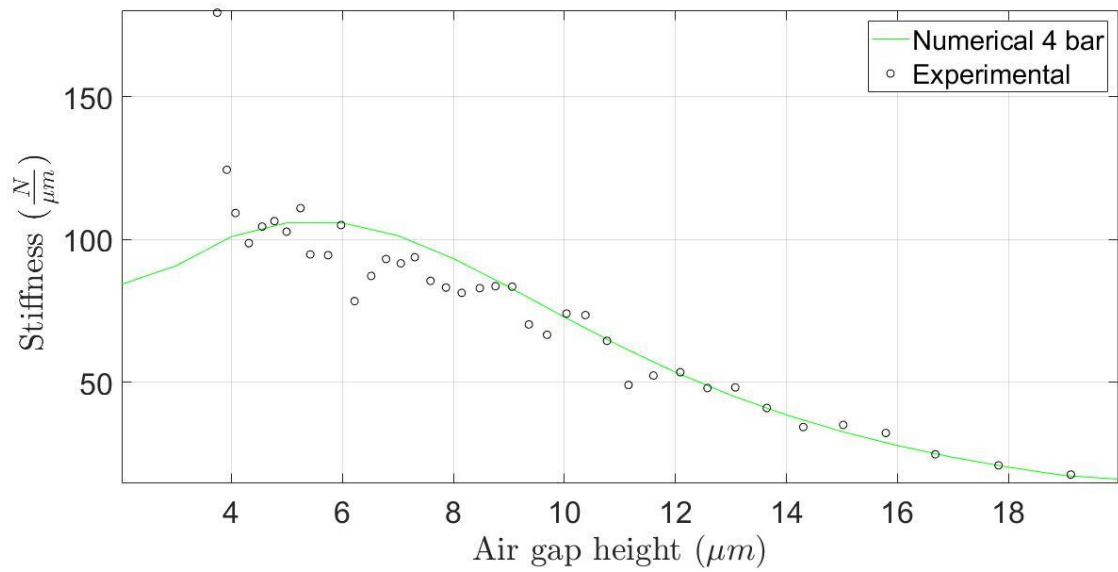


Figura 4.14 Curva di rigidezza del pattino NEW WAY 65 mm con pressione di alimentazione relativa 4 bar

## 4.8 Simulazione inserti grafite

Alla luce della validità del modello sono state eseguite delle simulazioni per poter confrontare le caratteristiche statiche di pattini pneumostatici porosi realizzati con le diverse tipologie di grafite studiate nei capitoli precedenti, in figura 4.15 si propone una tabella contenente le informazioni di porosità, permeabilità a differenza di pressione massima e codice identificativo della grafite. Per ciascun tipo di grafite è stato simulato il comportamento con una pressione di alimentazione relativa di 5 bar e una grandezza dell'inserto poroso pari 63 mm di diametro e 6 mm di spessore.

In figura 4.16 viene confrontato l'andamento della portata per le tre tipologie di grafite, l'andamento è estremamente differente. Infatti, la grafite atal raggiunge la portata massima quando il meato è alto 8  $\mu\text{m}$  allo stesso modo anche la grafite 25 dopo un primo tratto lineare va in regime sonico per meati elevati. Al contrario la grafite 27 anche con un meato alto 20  $\mu\text{m}$  ha un andamento della portata crescente. In figura 4.17 viene riportato l'andamento della portanza, per meati inferiori ai 5  $\mu\text{m}$  i tre inserti in grafite hanno una capacità di carico statico nell'ordine dei 1000 N confrontabili con il pattino della New Way. La grafite 27 ha un andamento quasi lineare, anche con un meato alto 20  $\mu\text{m}$  conserva una capacità di carico considerevole. La grafite atal presenta un andamento esponenziale al diminuire dell'altezza del meato, ha una portanza estremamente bassa ad altezze di meato elevate e una capacità di carico statico confrontabile con quella degli altri inserti a meati più bassi. La grafite 25 ha un andamento simile a quello del pattino New Way. Infine, in figura 4.18 si propone la caratteristica della rigidità. La grafite 25 ha un andamento molto simile a quello del pattino della New Way se non fosse che il massimo è di un valore inferiore e spostato verso destra, il che permette di ipotizzare un'altezza del meato di esercizio per questa grafite diverso da quella usata dal pattino della New Way. La grafite 27 ha un andamento discorde con gli altri tipi di grafite non presenta un massimo evidente e al diminuire del meato diminuisce la rigidità, è caratterizzata da valori di rigidità inferiori rispetto gli altri inserti. La grafite atal presenta un evidente punto di massimo a 4  $\mu\text{m}$  di altezza del meato, ad altezze superiori la rigidità è estremamente bassa. Se ne deduce che con questa grafite è possibile ottenere un pattino con una rigidità statica molto elevata, ma che lavora ad altezze di meato basse. È importante notare come nonostante la grafite del pattino New Way e la grafite 25 abbiano una permeabilità confrontabile i risultati ottenuti denotano delle prestazioni diverse il che permette di concludere che nella produzione di pattini pneumostatici porosi è essenziale che la permeabilità coincida.

| Codice identificativo Grafite | Porosità $\phi$                      | Permeabilità ( $\text{m}^2$ ) |
|-------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------|
| 25                            | 0.25                                 | $2.5 \cdot 10^{-15}$          |
| 27                            | 0.27                                 | $2.12 \cdot 10^{-14}$         |
| atal                          | 0.2                                  | $4.3 \cdot 10^{-16}$          |
| new way                       | Non misurabile e assente in catalogo | $2.15 \cdot 10^{-15}$         |

*Figura 4.15 tabella caratteristiche grafite simulata*



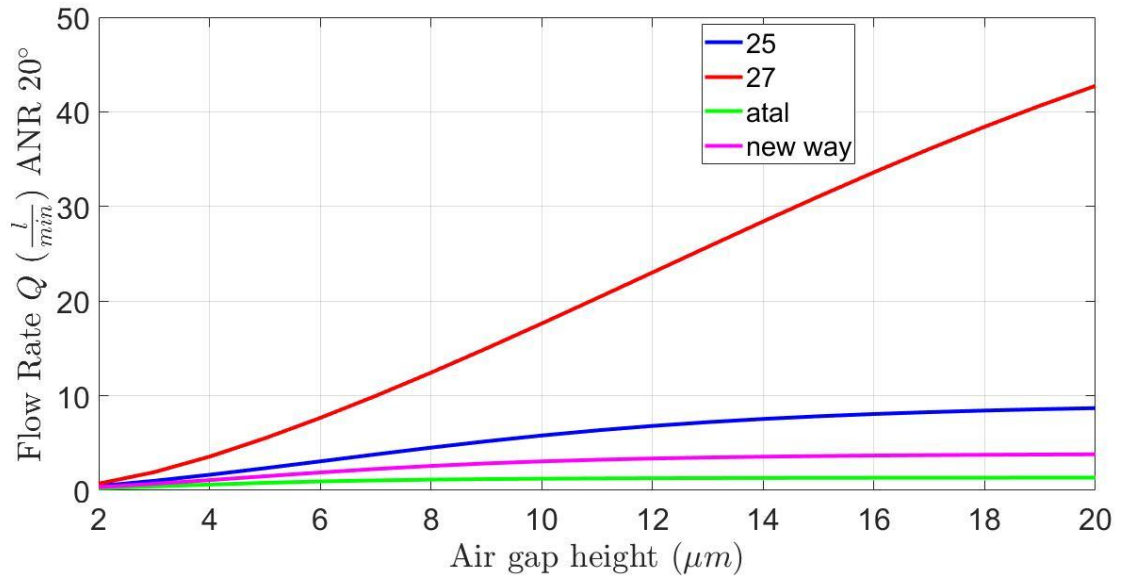


Figura 4.16 simulazione consumo dell'aria al variare dell'altezza del meato tra pattini pneumostatici porosi con grafite di permeabilità differente, pressione di alimentazione 5 bar

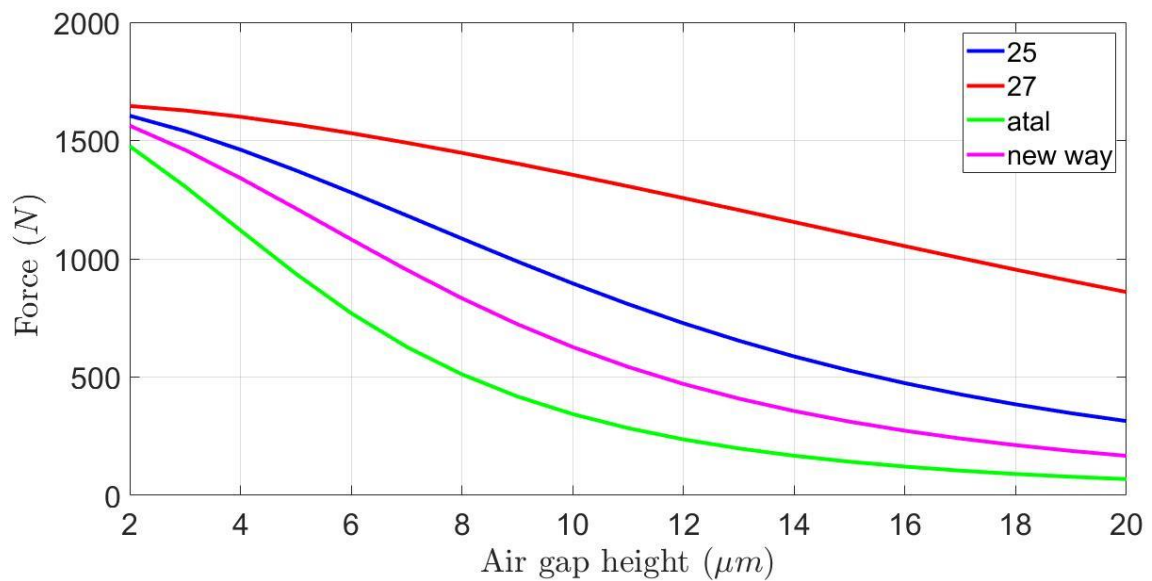
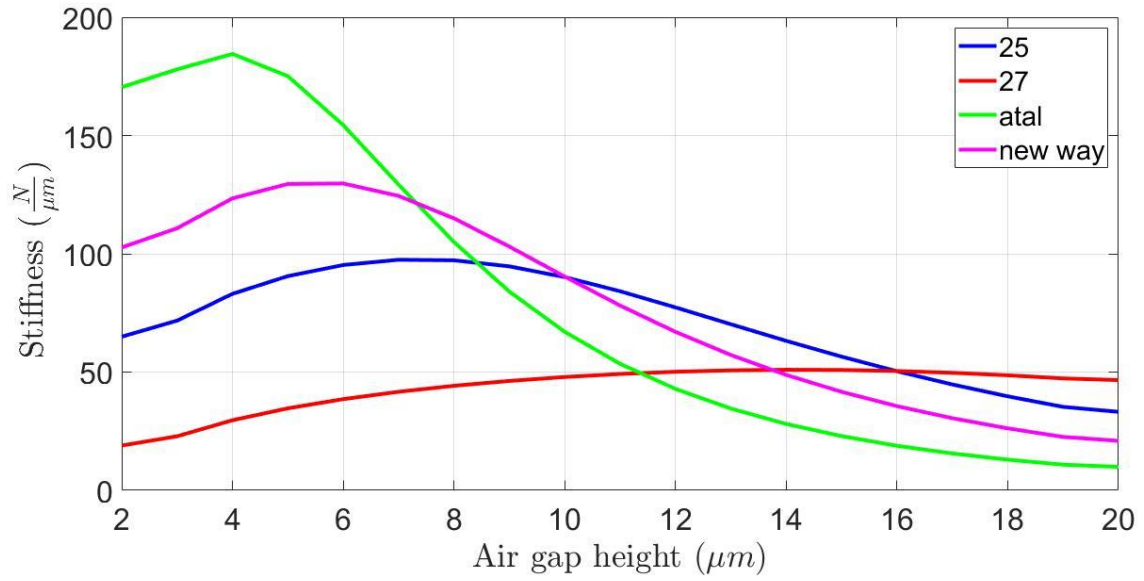


Figura 4.17 simulazione portanza al variare dell'altezza del meato tra pattini pneumostatici porosi con grafite di permeabilità differente, pressione di alimentazione 5 bar



*Figura 4.18 simulazione rigidezza statica al variare dell'altezza del meato tra pattini pneumostatici porosi con grafite di permeabilità differente, pressione di alimentazione 5 bar*

# Capitolo 5

## 5.1 conclusione e sviluppi futuri

I pattini pneumostatici rappresentano una tecnologia avanzata per i sistemi di movimentazione industriale, questi offrono un movimento preciso. L'assenza di contatto tra le superfici in movimento riduce l'attrito e di conseguenza il consumo di energia. I pattini pneumostatici non necessitano di lubrificazione, riducendo l'inquinamento da oli e grassi. Nonostante i vantaggi, hanno limitazioni dovute a ridotti valori di rigidità e scarso smorzamento. Queste problematiche possono essere mitigate scegliendo il sistema di alimentazione ideale.

Questo lavoro di tesi tratta lo studio del sistema di alimentazione poroso in grafite. Sono state eseguite delle prove sperimentali per lo studio di permeabilità, è stato costruito un banco che consente di valutare la pressione di monte e di valle, di inserti in grafite di 8 mm di diametro. Il banco permette di leggere e regolare la portata passante attraverso il provino. È stato determinato un procedimento per la creazione di provini particolarmente interessante, non è necessario fare affidamento a ditte esterne per la produzione dei provini e è possibile testare inserti di piccole dimensioni. Questo è utile se si vuole studiare la permeabilità di un materiale poroso contenendo i costi.

Sono stati costruiti dei pattini pneumostatici porosi di cui è possibile valutare la permeabilità su un banco specifico. È stata verificata la legge di Darcy e la legge di Darcy-Forchheimer con buoni risultati, è stata dimostrata l'importanza della scelta del valore sperimentale di permeabilità da adottare per la modellazione della portata.

Grazie all'analisi della permeabilità è stato possibile implementare un modello per la simulazione delle caratteristiche statiche di un pattino pneumostatico poroso. Il modello si basa sull'equazione di Reynolds. Il modello è stato validato sulla base di un pattino pneumostatico poroso commerciale, NEW WAY S106501. È stato possibile ottenere la permeabilità del pattino da una prova di getto libero. Grazie alle informazioni ricavate dal banco di permeabilità è stato possibile modellare la portata grazie alla legge di Darcy. Il modello ha permesso di simulare dei pattini costruiti con inserti di grafite differente. In particolare, è emerso che con la grafite commerciale acquistata si possono ottenere prestazioni statiche confrontabili con quelle del pattino New Way. In aggiunta, è emerso che per piccole variazioni di permeabilità le caratteristiche statiche di un pattino pneumostatico poroso cambiano notevolmente.

In futuro sarebbe interessante completare la finitura della superficie attiva del pattino costruito tramite processo di lappatura. In questo modo si potrebbe validare il modello con un inserto in grafite di permeabilità differente ed implementare nel modello delle caratteristiche statiche la legge di Darcy-Forchheimer. In aggiunta si ripone la possibilità in futuro di testare una tecnica per la modifica e la correzione della permeabilità.

# Bibliografia

- [1] European Commission. *The European green deal*. 2020, URL: [https://ec.europa.eu/info/sites/info/files/european-green-deal-communication\\_en.pdf](https://ec.europa.eu/info/sites/info/files/european-green-deal-communication_en.pdf)
- [2] Gao, Qiang, et al. "Aerostatic bearings design and analysis with the application to precision engineering: State-of-the-art and future perspectives." *Tribology International* 135 (2019): 1-17.
- [3] Witelski, T., D. Schwendeman, and P. Evans. "Analysis of pressurized porous air bearings." (2005).
- [4] Devitt, Andrew J., and New Way Air Bearings. "Porous vs. orifice air bearing technology." *New Way Air Bearings* 26.6 (1999).
- [5] <https://www.newwayairbearings.com/catalog/product/40mm-flat-round-air-bearings/>
- [6] Fourka, Mohamed, and Marc Bonis. "Comparison between externally pressurized gas thrust bearings with different orifice and porous feeding systems." *Wear* 210.1-2 (1997): 311-317.
- [7] Rasnick, W. H., et al. *Porous graphite air-bearing components as applied to machine tools*. No. Y-DA-5970; CONF-741108-3. Oak Ridge Y-12 Plant, Tenn.(USA), 1974.
- [8] Tankus, Kani, et al. "The effect of cutting parameters and cutting tools on machining performance of carbon graphite material." *Machining Science and Technology* 24.1 (2020): 96-111.
- [9] Vainio, Valtteri, et al. "Manufacturing and static performance of porous aerostatic bearings." *Precision Engineering* 84 (2023): 177-190.
- [10] Heidari, Mehdi, and Jiwang Yan. "Fundamental characteristics of material removal and surface formation in diamond turning of porous carbon." *International Journal of Additive and Subtractive Materials Manufacturing* 1.1 (2017): 23-41.
- [11] Khan, Zohaib Atiq, et al. "Dual network extraction algorithm to investigate multiple transport processes in porous materials: Image-based modeling of pore and grain scale processes." *Computers & Chemical Engineering* 123 (2019): 64-77.
- [12] Belforte, Guido, et al. "Permeability and inertial coefficients of porous media for air bearing feeding systems." (2007): 705-711.
- [13] Al-Bender, Farid. *Air bearings: theory, design and applications*. John Wiley & Sons, 2021.