

Alma Mater Studiorum · Università di Bologna

SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA

Dipartimento di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Energetica

TESI DI LAUREA

in

Energetica degli edifici e Impianti Termotecnici M

**Determinazione sperimentale delle perdite di carico di efflussi
forzati di aria in schiume metalliche di elevata porosità**

Candidato:

Nicola CHIAROTTI

Relatore:

Prof. Ing. Gian Luca MORINI

Correlatori:

Ing. Stefano CANCELLARA

AA 2017 - 2018

Sessione III

Sommario

Introduzione.....	3
Capitolo I: Le schiume metalliche.....	5
1.1 Definizione e modalità di fabbricazione.....	5
1.2 Classificazione delle schiume.....	5
1.2.1 Materiale.....	5
1.2.2 Struttura.....	7
1.2.3 Caratteristiche morfologiche.....	7
1.3 Schiume utilizzate nel caso studio.....	9
1.4 Proprietà delle schiume metalliche.....	11
Capitolo II: Il modello fisico teorico.....	13
2.1 I mezzi porosi.....	13
2.2 La legge di Darcy e sue estensioni.....	14
2.2.1 La legge di Darcy.....	14
2.2.2 La legge di Darcy-Forchheimer.....	14
Capitolo III: Apparato sperimentale.....	19
3.1 Schema generale.....	19
3.1.1 Sigillature all'aria.....	20
3.2 Apparecchiature.....	21
3.2.1 Ventilatore.....	22
3.2.2 Flangia tarata.....	23
3.2.3 Manometri differenziali.....	25
3.2.4 Calibro digitale.....	26
3.2.5. Bilancia.....	26
3.3 Analisi dell'Errore.....	27
3.3.1 Introduzione.....	27
3.3.2 Metodo per il calcolo dell'errore casuale.....	27
3.3.2.1 Errore sul calcolo della sezione del provino.....	28
3.3.3 Metodo per il calcolo della propagazione degli errori.....	28
3.3.3.1 Errore sul calcolo della portata in massa.....	30
3.3.3.2 Errore sul calcolo della velocità.....	32
3.3.3.3 Errore sul calcolo delle perdite di carico per unità di lunghezza.....	32
Capitolo IV: Risultati sperimentali.....	37
4.1 Precisazioni sul modello teorico.....	37
4.2 Metodo di acquisizione dati.....	38

4.2.1 Procedura preliminare	38
4.2.2 Esempio di raccolta dati	41
4.3 Analisi dei risultati	45
4.3.1 Perdite di carico	45
4.3.1.1 Influenza dell'ordine delle schiume e della loro orientazione	46
4.3.1.2 Confronto tra scambiatore e schiume sulla curva caratteristica del ventilatore	49
4.3.2 Gradiente di perdita di carico	52
4.3.2.1 Dipendenza dallo spessore	53
4.3.2.2 Dipendenza dalla velocità	58
4.3.3 Linearizzazione di Darcy-Forchheimer	63
4.3.3.1 Calcolo della dispersione dei risultati	66
4.3.3.2 Calcolo della permeabilità k	70
4.3.4 Studio sulla dispersione della permeabilità k	75
4.3.4.1 Cono d'errore ed estrapolazione di k	76
4.3.5 Rappresentazione adimensionale dei risultati sperimentali	85
4.3.6 Ulteriori prove sperimentali	87
4.3.6.1 Gradiente di perdita di carico: schiume NCX	88
4.3.6.2 Linearizzazione di Darcy-Forchheimer: schiume NCX	89
4.3.6.3 Studio dei parametri fluidodinamici: schiume NCX	90
4.4 Ridiscussione dell'approccio al modello teorico	92
4.4.1 Precisazioni sul modello di Darcy-Forchheimer	92
Capitolo V: Conclusioni	95
5.1 Conclusioni sul modello teorico	95
5.2 Conclusioni sui risultati sperimentali	95
5.3 Conclusioni sulle schiume metalliche	96
5.3.1 Perdite di carico	96
5.3.2 Scambio termico	96
5.4 Sviluppi futuri	97
Bibliografia	99
Ringraziamenti	103

Introduzione

Nell'odierno panorama impiantistico, relativo alla termotecnica per la climatizzazione degli ambienti, grande importanza risiede nei dispositivi per il trattamento dell'aria, e fra questi anche i ventilconvettori. Tali apparati si servono di batterie di scambio di calore fabbricate in materiale termicamente conduttivo, solitamente leghe di alluminio o rame, atte a trasferire il calore da un ambiente ad un altro tramite un circuito di scambio termico bifase; sono quindi impianti adatti sia per il riscaldamento che per il raffrescamento degli edifici.

Dato che grande importanza risiede nella capacità di scambio termico di tale batteria metallica, appare ovvio come, con l'avanzare del tempo e con l'incalzante incremento delle restrizioni normative in campo energetico, diverrà d'importanza critica l'efficientamento degli impianti termotecnici installati negli edifici, con un vantaggio sia in termini ambientali, sia di riduzione del costo della componente energia per le abitazioni.

Nel caso studio in questione, si è valutata la prestazione di materiali innovativi, quali le schiume metalliche, attraverso la misurazione di perdite di carico ai capi di campioni di schiuma metallica, posizionati all'interno di un apposito circuito aeraulico. Tale parametro è stato giudicato di fondamentale importanza per una futura applicazione industriale su larga scala, elaborando quindi un modello atto a caratterizzare tali materiali dal punto di vista fisico, con il proponimento ultimo di soppesare la convenienza della sostituzione degli odierni scambiatori di calore con materiali innovativi come le schiume metalliche.

Capitolo I: Le schiume metalliche

1.1 Definizione e modalità di fabbricazione

Le schiume metalliche sono materiali porosi, caratterizzati da una struttura metallica solida in cui i pori sono distribuiti in maniera casuale. Il motivo di tale distribuzione casuale dei vuoti è da ricercarsi *in primis* nel metodo di fabbricazione di tali schiume, il quale comprende un substrato di schiuma poliuretanica, sul quale viene compiuto un processo di elettrodeposizione di polveri metalliche, con conseguente rimozione del substrato schiumoso tramite pirolisi, lasciando solamente la struttura metallica residua, la quale viene, infine, trattata termicamente prima di poter essere usata in applicazioni ingegneristiche. In base al tipo di schiuma usata come substrato o ad altre modificazioni di processo, le schiume possono sviluppare caratteristiche differenti l'una dall'altra. Questo processo di elettrodeposizione di polveri metalliche è, ad oggi, non ancora largamente diffuso, in quanto necessita di apparecchiature moderne, facendo lievitare così il costo di produzione delle schiume metalliche; in un futuro prossimo, le economie di scala potrebbero ridurre considerevolmente il costo di tali dispositivi. Le applicazioni industriali per le quali vengono utilizzate schiume metalliche spaziano dall'ingegneria aerospaziale, chimica, medica, fino a quella informatica e, come nel caso studio presentato, energetica, sebbene in maniera sperimentale.

1.2 Classificazione delle schiume

1.2.1 Materiale

Una prima distinzione fra le varie tipologie di schiume può essere effettuata partendo dal materiale primario che le costituisce:

- **Metallico:** comunemente a base di alluminio o rame, ma presenti anche sotto forma di leghe a base di nichel, titanio, silicio, perfino acciaio, ottone e bronzo per applicazioni sanitarie, e molte altre. Tale tipologia di schiuma è rappresentativa dei materiali utilizzati in questo caso studio;
- **Ceramico:** composte di materiali quali ossidi di alluminio (Al_2O_3), carburi di silicio (SiC) ed ossidi di zirconio (ZrO_2); di diffuso utilizzo come filtri da fonderia e per particolato.

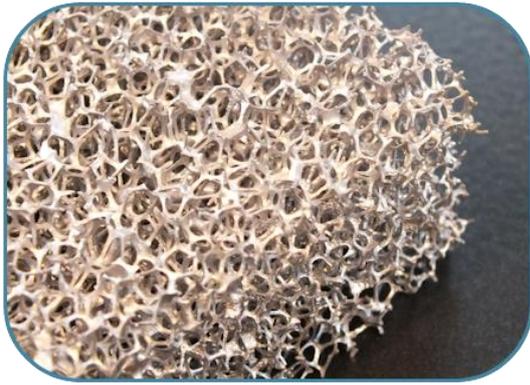


Figura 1.1 Schiuma metallica di alluminio.

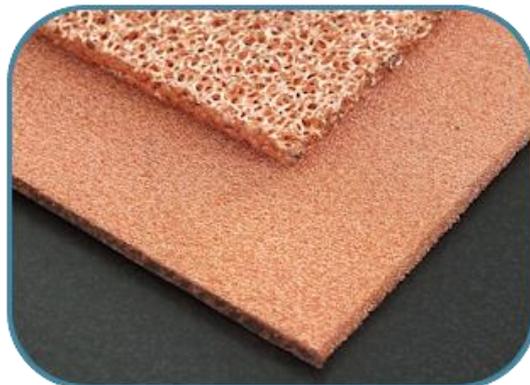


Figura 1.2 Schiuma metallica di rame.

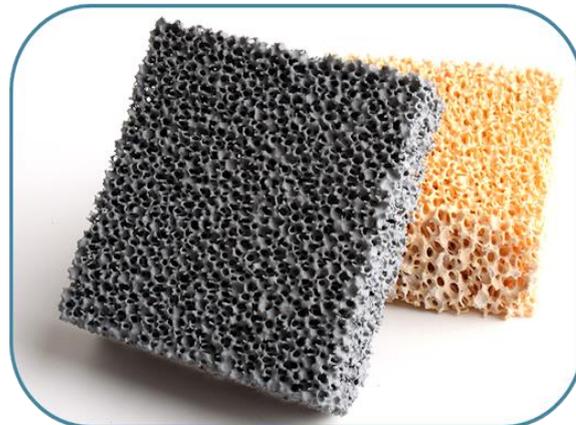


Figura 1.3 Schiume ceramiche.

In base al tipo di materiale utilizzato per la fabbricazione, le caratteristiche fisiche di una schiuma, quali la *resistenza meccanica* e la *conducibilità termica*, possono cambiare. Oltre al materiale primario costituente lo scheletro della schiuma, è possibile scegliere dei rivestimenti che ne influenzino le proprietà di superficie, attributo estremamente importante nell'industria chimica, ove vengono utilizzate come componenti nei reattori. Fra i *coating* con cui è possibile rivestire la schiuma si annovera il nitrato di titanio (TiN) e l'oro (spesso usato come catalizzatore).



Figura 1.4 Schiuma con coating di TiN. Figura 1.5 Schiuma con coating di oro.

1.2.2 Struttura

Un'ulteriore distinzione che è possibile fare a proposito delle schiume metalliche concerne la loro struttura interna:

- **A celle aperte:** tali schiume (anche dette *spugne metalliche*) presentano pori interconnessi fra di loro, consentendo il passaggio di fluidi attraverso esse, le schiume di questa tipologia sono state utilizzate nel caso studio ivi presentato;
- **A celle chiuse:** tali schiume presentano dei vuoti d'aria racchiusi da barriere metalliche, lo scheletro della schiuma riveste completamente il poro, riducendo di molto la capacità di permeazione dei fluidi.

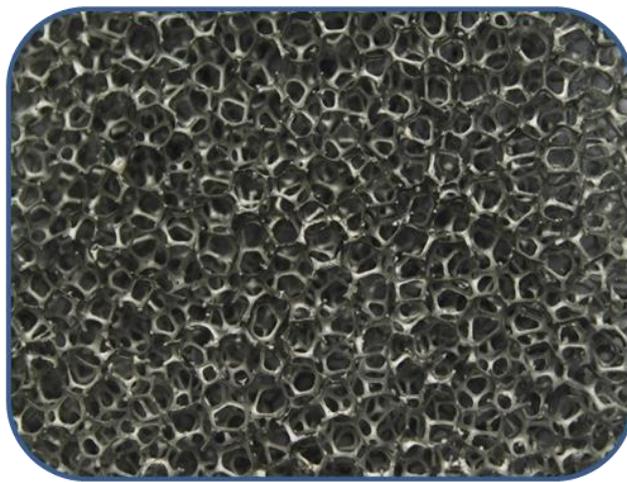


Figura 1.6 Schiuma metallica a celle aperte.

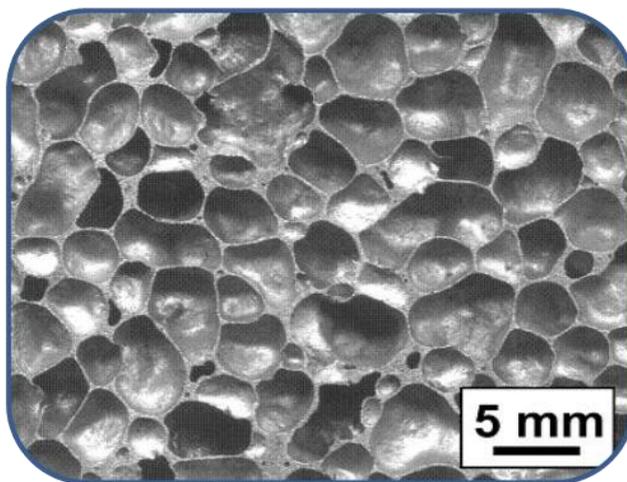


Figura 1.7 Schiuma metallica a celle chiuse.

1.2.3 Caratteristiche morfologiche

Infine, si possono classificare le schiume in base ad alcune caratteristiche morfologiche fondamentali, quali:

- **Porosità:** definita come il rapporto fra il volume occupato dai vuoti diviso il volume totale della schiuma, infatti solitamente oscilla fra il 75% ed il 95%, ma è possibile avere anche valori superiori in schiume particolarmente lasche;
- **Diametro della cella:** definito come il diametro medio del poro, costituente la cella elementare della schiuma metallica. Si tratta di un parametro spesso utilizzato per caratterizzare la schiuma metallica;
- **Spessore della fibra:** definito come lo spessore medio delle fibre circondanti il vuoto. Si tratta anch'esso di un parametro usualmente utilizzato per la caratterizzazione della schiuma;
- **PPI (*pores per linear inch*):** è un parametro normalmente fornito dal costruttore, indicante il numero medio di pori presenti per ogni pollice lineare di lunghezza. Tale valore è intimamente legato a diametro del poro e spessore della fibra e può variare considerevolmente, dai 5 PPI, fino a 60 PPI per le schiume più fitte. I costruttori, per data schiuma, usano fornire un *range* di PPI (es. 17÷23 PPI), piuttosto che un numero fisso, poiché è un parametro soggetto a grandi variazioni, data la struttura casuale della schiuma.

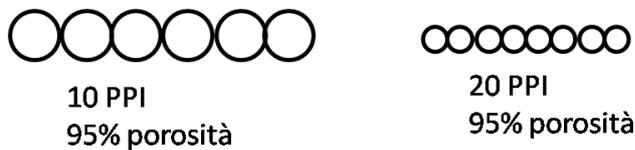


Figura 1.8 Struttura della schiuma al variare dei PPI, porosità fissa.



Figura 1.9 Struttura della schiuma al variare della porosità, PPI fissi.

Tali parametri sono, ovviamente, fra loro interconnessi, ed influenzano il comportamento termofluidodinamico della cella, suggerendo che sussista una correlazione fra tali grandezze ed altri parametri fluidodinamici, che verranno introdotti successivamente.

1.3 Schiume utilizzate nel caso studio

Nell'esperienza del caso studio ivi presentato sono stati utilizzati diversi tipi di schiume metalliche, principalmente di alluminio o leghe di alluminio, raccolte nella tabella sottostante comprensiva di produttore, materiale e caratteristiche morfologiche:

Tabella 1.1: Riassunto delle schiume metalliche utilizzate nel caso studio presentato.

Nome	Materiale	Produttore	Dimensione [mm ³]	Porosità [%]	PPI
Provino n°1	Al7SiMg	Mayser	100x100x20	96,5%	10
Provino n°2	Al7SiMg	Mayser	100x100x20	96,7%	10
Provino n°3	Al7SiMg	Mayser	100x100x20	96,6%	10
Provino n°4	Al7SiMg	Mayser	100x100x20	96,5%	10
Provino n°5	Al7SiMg	Mayser	100x100x20	96,6%	10
Provino n°6	Al7SiMg	Mayser	100x100x20	96,4%	10
Provino n°7	Alluminio (99,7%)	Mayser	100x100x20	96,5%	10
Provino n°8	Alluminio (99,7%)	Mayser	100x100x20	96,6%	10
Provino n°9	NCX1116 ¹	Recemat	100x100x20	93,9%	11-16
Provino n°10	NCX1116	Recemat	100x100x20	93,3%	11-16
Provino n°11	NCX1116	Recemat	100x100x20	91,8%	11-16

¹ La Lega NCX è una lega costituita da vari elementi metallici in percentuali variabili, in cui i componenti principali sono Nichel (49%-64%), Cromo (30%-45%) e Ferro (~5%), in questo caso. La dicitura 1116 indica un range di PPI da 11 a 16.

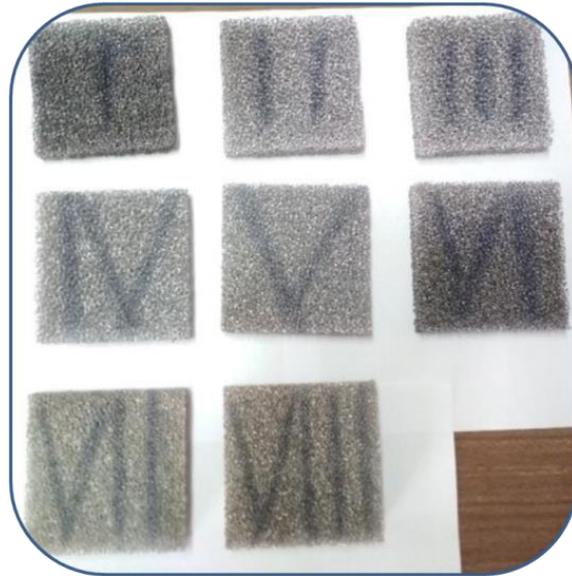


Figura 1.10 Rassegna di alcune schiume metalliche.

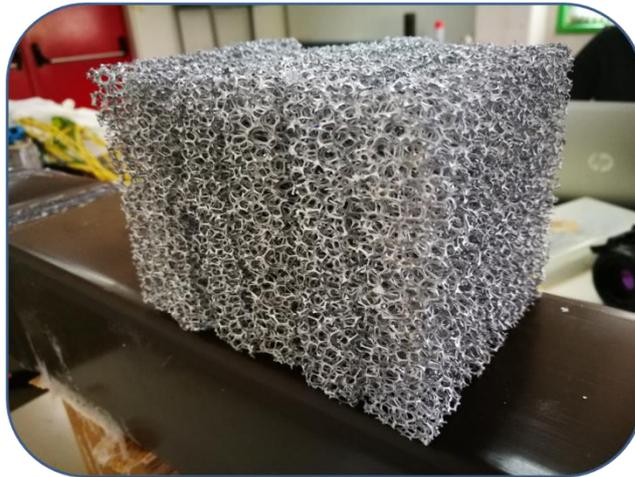


Figura 1.11 Altra raffigurazione delle schiume.

È utile precisare che i dati trascritti in Tabella 1.1 sono stati calcolati attraverso misurazioni, effettuate attraverso misurazioni di massa delle schiume metalliche, essenziali per misurarne l'effettiva proporzione fra volumi vuoti e pieni, attraverso un banale calcolo seguentemente presentato nell'equazione 1.1, con riferimento al campione di schiuma in esame:

φ = *porosità della schiuma*

$$\varphi [\%] = \frac{\text{massa teorica} - \text{massa effettiva}}{\text{massa teorica}} \cdot 100 \quad (1.1)$$

Invece, per quanto riguarda il calcolo del diametro medio del poro, è stato fatto affidamento al lavoro di tesi² concernente l'utilizzo di codici MATLAB per elaborazione immagini. Tale lavoro, svolto nello stesso laboratorio del caso studio presentato, ha permesso di identificare i pori presenti sulla superficie della schiuma e racchiuderli in specifici *range* diametrometrici, determinando un metodo riproducibile per la caratterizzazione delle schiume metalliche in futuro.

1.4 Proprietà delle schiume metalliche

Oltre alle proprietà caratterizzanti citate in precedenza, utili per la classificazione delle schiume metalliche, esistono altre qualità vevoli di considerazione, che ne attribuiscono maggior valore per le applicazioni industriali che si andranno ad analizzare. A causa del peculiare metodo di produzione che viene intercorso dalle schiume metalliche, esse sviluppano una struttura quasi **isotropica**. Da un punto di vista prettamente strutturale, tali schiume fanno parte della categoria dei materiali porosi, differenziandosi tuttavia da altri materiali appartenenti alla stessa categoria, quali sabbie silicatiche o rocce vulcaniche, per il diverso grado di porosità. Nel caso delle schiume metalliche, soprattutto nel caso di schiume cosiddette lasche, dai pori larghi e dalla porosità elevata, tendente al 100%, non si raggiunge lo stesso grado di compattezza delle celle elementari, producendo quindi un diverso comportamento se attraversate da un fluido.

Fra gli attributi che le schiume possono vantare, oltre i sopracitati, si annovera l'**alto rapporto S/V** (superficie su volume); questa caratteristica è di fondamentale importanza per un ipotetico scambiatore di calore, poiché riduce l'ingombro del macchinario, mantenendo al contempo inalterate le capacità di scambio, fondate appunto sull'elevata superficie con cui la schiuma si interfaccia al fluido da trattare. In secondo luogo, l'**alta porosità** del materiale permette di limitare enormemente il peso della struttura, ciò è direttamente correlato al *diametro del poro* ed inversamente proporzionale allo *spessore della fibra*. In ultima istanza, l'**alta conducibilità termica** delle fibre della schiuma suggerisce buone capacità termiche, al pari delle attuali batterie di scambio alettate.

Grazie a queste proprietà le schiume metalliche appaiono interessanti in molteplici ambiti industriali. In effetti, il loro utilizzo come dissipatore di calore nell'industria aerospaziale non è nuovo, ciò suggerisce l'esistenza di ulteriori campi di applicazione dal punto di vista energetico, fondati sui principali elementi distintivi che le contraddistinguono come materiali innovativi.

² Amicone A., “Caratterizzazione morfologica di schiume metalliche mediante l'elaborazione di immagini in ambiente MATLAB”, Tesi di Laurea, Università di Bologna, (2018)

Capitolo II: Il modello fisico teorico

2.1 I mezzi porosi

I *mezzi porosi* sono materiali solidi caratterizzati da una struttura interna prevalentemente cava o, appunto, porosa. Per tali materiali è definibile un rapporto volumetrico espressivo del loro “grado di vuoto”. Tale rapporto, definito appunto *porosità* ed indicato con la lettera greca φ , può variare fra 0 ed 1, dove lo zero rappresenta un materiale solido assolutamente compatto, senza alcun tipo di vuoto entro la propria struttura interna. Non a caso la porosità, per come è stata definita, esprime il volume occupabile dal fluido all’interno dei pori, rispetto al volume totale occupato dal mezzo poroso (eq. 2.1).

$$\varphi = \frac{V_f}{V} \quad (2.1)$$

dove:

- V_f rappresenta il volume occupato dal fluido;
- V rappresenta il volume totale del mezzo poroso.

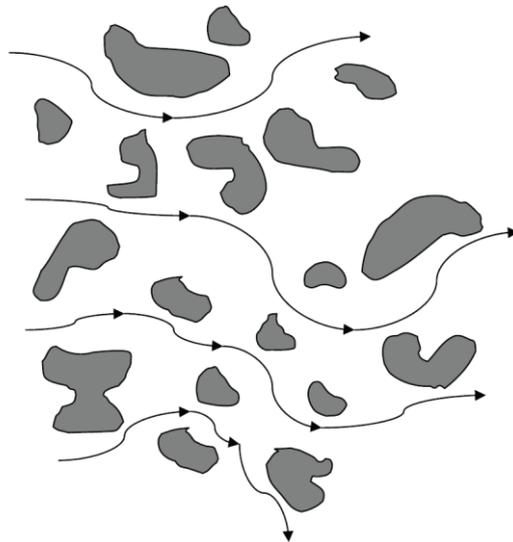


Figura 2.1: Schema di un mezzo poroso.

Si possono definire, a seguito di ciò, due velocità fondamentali nello studio della fluidodinamica dei mezzi porosi: la **velocità intrinseca** (eq. 2.2) e la **velocità Darciana** (eq. 2.3).

$$\mathbf{U} = \frac{1}{V_f} \int_{V_f} \mathbf{u}^* dV \quad (2.2)$$

$$\mathbf{u} = \frac{1}{V} \int_V \mathbf{u}^* dV \quad (2.3)$$

Stabilendo quindi una semplice relazione, la quale lega le due velocità (eq. 2.4).

$$\mathbf{u} = \varphi \mathbf{U} \quad (2.4)$$

Tale equazione è anche detta *relazione di Dupuit-Forchheimer*. Il valore della grandezza \mathbf{u} , rappresentativa della *velocità Darciana* del fluido, dipende in larga parte dalla forma e dalla dimensione dei pori, così come dalle cause che determinano il moto del fluido.

2.2 La legge di Darcy e sue estensioni

2.2.1 La legge di Darcy

La formulazione più semplice del moto di un fluido all'interno di un mezzo poroso viene dalla **legge di Darcy**, espressa dall'equazione 2.5, ivi rappresentata.

$$\frac{\mu}{k} \mathbf{u} = -\nabla p + \mathbf{F} \quad (2.5)$$

dove:

- μ è la viscosità dinamica del fluido [$Pa \cdot s$];
- k è la permeabilità del mezzo [m^2];
- p è la pressione del fluido [Pa];
- \mathbf{F} è la forza esterna applicata al fluido, per unità di volume $\left[\frac{Pa}{m}\right]$

Se il flusso è laminare, un mezzo poroso può essere astratto come una rete interconnessa di microscopici canali, attraverso cui il fluido scorre. In tal caso, in assenza di forze esterne, il gradiente di pressione è linearmente proporzionale alla velocità.

La legge di Darcy si riferisce appunto a questo caso, potendo considerare quindi k una proprietà del mezzo poroso dipendente dal numero di pori presenti per unità di area, così come dalla loro forma e dimensione. Se, tuttavia, al contrario, il regime è fortemente turbolento, il gradiente di pressione diventa proporzionale al quadrato della velocità, ciò tuttavia devia dalla legge di Darcy, alla quale, a questo punto, occorre applicare una correzione ed estenderla ad un caso di moto turbolento del fluido.

2.2.2 La legge di Darcy-Forchheimer

In un regime di moto in cui la *legge di Darcy* non sia applicabile, allora la proporzionalità diretta fra forze applicate al fluido e la sua velocità risultante deve

essere abbandonata in favore di un modello che descriva una graduale transizione verso il regime idraulico dove le forze applicate sono ora dipendenti al quadrato della velocità del fluido. L'estensione della legge di Darcy adattata in tal senso prende il nome di **legge di Darcy-Forchheimer**. L'equazione che esprime la legge di Darcy-Forchheimer è ivi rappresentata (eq. 2.6):

$$\frac{\mu}{k} \cdot \left(1 + \frac{\rho \cdot f \cdot \sqrt{k}}{\mu} |\mathbf{u}| \right) \mathbf{u} = -\nabla p + \mathbf{F} \quad (2.6)$$

dove:

- f è il coefficiente inerziale della schiuma (*friction factor*) [adim.];
- ρ è la densità del fluido $\left[\frac{kg}{m^3} \right]$;
- $|\mathbf{u}|$ è il modulo della velocità Darciana $\left[\frac{m}{s} \right]$.

Si noti come il modello di Darcy-Forchheimer appena enunciato comprenda la legge di Darcy come proprio caso particolare, quando si calcola il limite dell'equazione 2.6 per $f \rightarrow 0$. Si noti come, in tale regime di moto del fluido, coesistano due distinti regimi di moto, descritti nel primo membro dell'equazione: il primo, cosiddetto *termine viscoso*, in quanto dipendente dalla viscosità dinamica del fluido, ed un secondo termine, detto *termine inerziale*, in cui compare il fattore d'inerzia f , stavolta dipendente dal quadrato della velocità. Ricordando brevemente la formulazione del numero di Reynolds (eq. 2.7):

$$Re_k = \frac{\rho |\mathbf{u}| \sqrt{k}}{\mu} = \frac{|\mathbf{u}| \sqrt{k}}{\nu} \quad (2.7)$$

dove:

- ρ è la densità del fluido $\left[\frac{kg}{m^3} \right]$.
- u è la velocità Darciana del fluido $\left[\frac{m}{s} \right]$;
- d è la lunghezza caratteristica [m];
- μ è la viscosità dinamica del fluido [Pa · s].

Si comprende immediatamente come, all'aumentare della velocità, ricordando la (2.6), a Re_k sempre maggiori, il contributo quadratico dominerà sul termine lineare, distinguendo quindi tre regioni: la prima -a Re_k bassi-, lineare con la velocità, una seconda -a Re_k alti-, con andamento quadratico rispetto alla velocità, più una terza regione di transizione fra questi due regimi, ove nessuno dei due contributi domina eccessivamente sull'altro, circa equivalendosi. Diversi autori, nella letteratura presente, concordano nell'asserire che il regime di Darcy-Forchheimer sia applicabile ovunque il numero di Reynolds definito in base alla permeabilità k sia maggiore o uguale a 1. Tale comportamento può facilmente essere estrapolato dal

grafico (fig. 2.1) che esprime la dipendenza del parametro adimensionale f_k in funzione del numero di Reynolds Re_k ; trattasi del numero di Reynolds definito a partire dalla permeabilità, precedentemente citato.

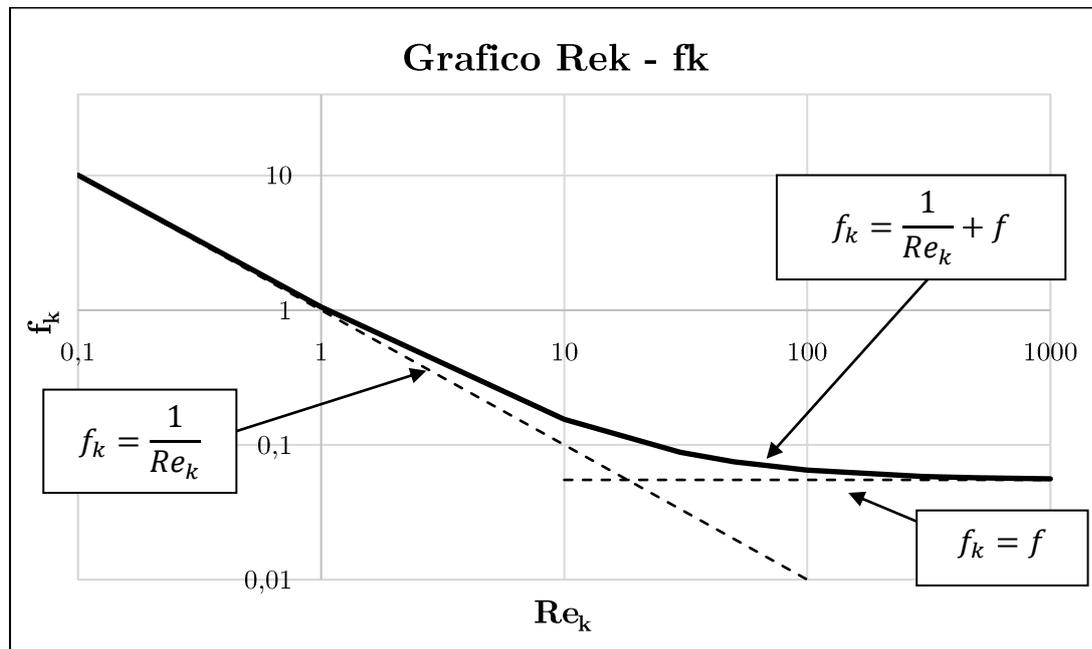


Figura 2.2: Esplicazione dei due regimi di moto del fluido e della dipendenza del valore di f_k .

dove i parametri inseriti sui due assi sono definiti tramite le equazioni (eqq. 2.7 & 2.8).

$$Re_k = \frac{|u|\sqrt{k}}{\nu} \quad (2.7)$$

$$f_k = \frac{\sqrt{k}}{\rho u^2} \cdot \left(-\frac{dp}{dz}\right) \quad (2.8)$$

con $\nu = \frac{\mu}{\rho} \left[\frac{m^2}{s}\right]$, ove ν rappresenta la viscosità cinematica del fluido.

L'equazione 2.6 può altresì essere espressa tramite l'equazione 2.9, mettendo in evidenza il contributo dei due termini dipendenti dalla *velocità Darciana* u , sottolineando l'esistenza di due regimi alternativamente prevalenti l'uno sull'altro al variare della velocità, e quindi della turbolenza del regime di moto del fluido, considerando il fluido in assenza di forze esterne.

$$-\frac{dp}{dz} = \frac{\mu}{k} \cdot u + \frac{f \cdot \rho}{\sqrt{k}} \cdot u^2 \quad (2.9)$$

Nel regime di transizione fra il regime di Darcy e quello di Forchheimer, denominato a volte *regime inerziale debole*, viene spesso usata la correlazione cubica (eq. 2.10), ivi sotto riportata:

$$-\frac{dp}{dz} = \frac{\mu}{K}u + \frac{\gamma\rho^2}{\mu}u^3 \quad (2.10)$$

dove γ è un parametro adimensionale per il termine non-lineare.

Capitolo III: Apparato sperimentale

3.1 Schema generale

L'apparato utilizzato per l'indagine sperimentale condotta nel caso studio in questione, si compone di diverse strumentazioni, ognuna delle quali è stata assemblata mantenendo una coerenza di percorso con i risultati che si è voluto ottenere, garantendo pertanto un rigoroso procedimento di raccoglimento dei dati, imprescindibile per la buona riuscita di un esperimento. Lo schema sottostante raffigura sinteticamente le componenti dell'apparato sperimentale utilizzato:

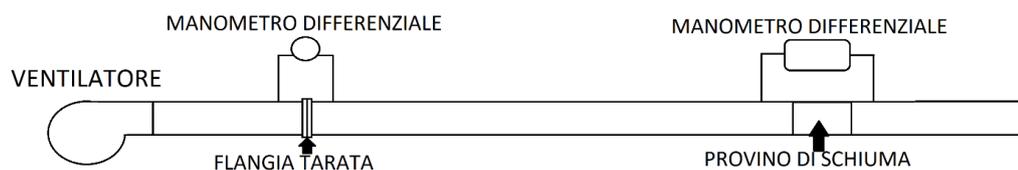


Figura 3.1: Schema riassuntivo dell'apparato.



Figura 3.2: Fotografia dell'apparato.

Dovendo testare la prestazione di campioni di schiuma metallica al passaggio dell'aria, è stato necessario costruire un apposito apparato, che simulasse le condizioni operative a cui lo scambiatore di calore sarebbe dovuto sottostare. Si può immediatamente notare come l'aria venga sospinta attraverso un ventilatore, percorrendo successivamente un tratto di canale a sezione circolare, ben coibentato tramite gommapiuma per evitare influenze termiche esterne, e di lunghezza pari ad almeno 10 diametri del tubo, con il preciso scopo di permettere lo sviluppo completo del moto dopo l'attraversamento di un ostacolo.

In corrispondenza di una flangia tarata, provvista di diaframma regolante, necessaria per il calcolo della portata d'aria in attraversamento, l'aria nel canale passa nella seconda sezione circolare, anche questa lunga almeno circa 10 diametri. In

ultimo, alla fine del secondo tratto circolare avviene un cambio di sezione, da circolare a quadrata (come indicato in fig. 3.3), corrispondente all'inizio dell'ultimo tratto di canale aerulico. Anche in questo caso è necessario fornire una lunghezza

aggiuntiva di almeno 10 diametri per ripetere ulteriormente il completo sviluppo del moto del fluido.

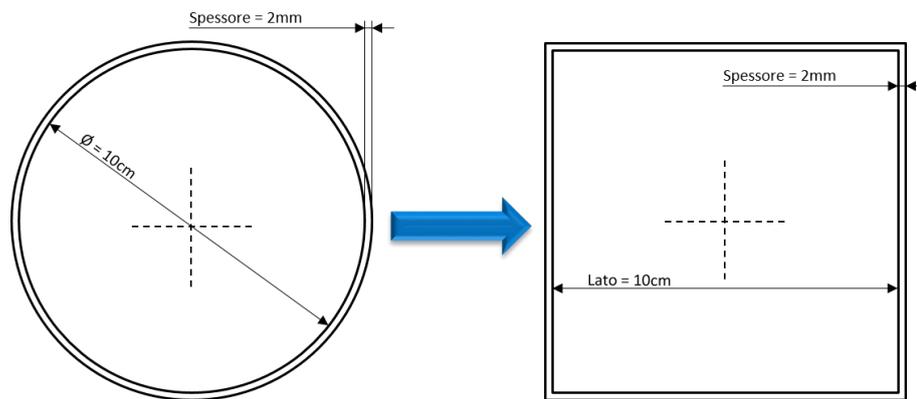


Figura 3.3: Cambiamento della sezione del canale aeraulico.

L'ultima sezione del tubo è stata fabbricata in PVC, materiale piuttosto economico e leggero da trasportare, meno deformabile agli urti e più elastico rispetto alle precedenti sezioni di tubo, di materiale metallico. La giuntura fra la sezione quadrata e quella circolare è stata giunta utilizzando materiale plastico e sigillata all'aria con del silicone.

3.1.1 Sigillature all'aria

Data la sensibilità dell'apparato ad eventuali perdite d'aria che possano inficiare la replicabilità dei risultati sperimentali sono state effettuate diverse sigillature all'aria in corrispondenza dei giunti fra le varie sezioni del canale, rispettivamente in corrispondenza della flangia tarata, del giunto con cambio di sezione e del tratto terminale di canale in cui è stato inserito il provino. La sigillatura, nella fattispecie, è stata realizzata utilizzando silicone acetico oppure semplicemente nastro adesivo rinforzato, come mostrato in fig. 3.4.



Figura 3.4: Ulteriori sigillature all'aria.

Mentre le prime due sigillature non sono state praticamente quasi mai perturbate durante il corso degli esperimenti, la terza, in corrispondenza della sezione terminale

del canale, quella contenente il provino di schiuma metallica, è stata replicata ad ogni cambio di provino inserito nel canale.

Per testare l'effettiva resistenza di tali occlusioni al passaggio dell'aria è stato impostato il ventilatore alla massima velocità raggiungibile, in corrispondenza di 50Hz misurati dall'*inverter* (fig. 3.6). La prova effettuata per verificare la prestazione della tenuta è stata effettuata in presenza di un campione di schiuma a 20 PPI di lega di Ni; la struttura più fitta di questa schiuma fa sì che l'aria sia ancor più spronata ad uscire attraverso delle fessure accidentali, qualora ve ne fossero, incrementando la veridicità della prova. Se l'ipotesi iniziale di perfetta tenuta all'aria si fosse rivelata esatta i risultati di perdita di carico in presenza ed in assenza di sigillatura avrebbero dovuto manifestare almeno una minima differenza in termini di perdita di carico, tuttavia, come mostrato in tab. 3.1, le già minime differenze di perdita di carico dovute a minuscole fenditure all'aria vengono fuggite completamente dalla sigillatura effettuata con del semplice nastro adesivo.

Tabella 3.1: Dati sulle perdite di carico con e senza sigillatura all'aria.

Senza sigillatura			Con sigillatura		
$\Delta P_{\text{diaframma}}$ [Pa]	Vel. frontale u [m/s]	ΔP [Pa]	$\Delta P_{\text{diaframma}}$ [Pa]	Vel. frontale u [m/s]	ΔP [Pa]
516	8,4	59	516	8,4	60

3.2 Apparecchiature

Al fine di descrivere rigorosamente l'impianto del caso studio, è stato deciso di presentare una lista completa delle apparecchiature installate ed utilizzate, suddividendole fra macchinari e strumenti di misura, descrivendone esaurientemente la funzione e le caratteristiche ad essi associate.

3.2.1 Ventilatore



Figura 3.5: Ventilatore Cimme GCH mod. 003540



Figura 3.6: Inverter.

Il ventilatore è un Cimme GCH, modello 003540. Si tratta di un ventilatore di tipo centrifugo, alimentato da un motore elettrico dalla potenza nominale P_{nom} pari a 1,1 kW. La curva caratteristica del ventilatore è stata calcolata a partire da una tabella di dati fornita dal costruttore, da cui poi è stato estrapolato il relativo grafico (fig. 3.7). Il numero di giri del ventilatore è regolato tramite un *inverter*, a sua volta collegato alla rete elettrica (fig. 3.6).

Tabella 3.2: Raccolta dati fornita dal costruttore.

Modello	P_{abs} [kW]	P_{inst} [kW]	N [rpm]	Lp [dBA]	Portata [m ³ /min]										
					8	9	10	11	12	14	16	18	20	22	25
					Pressione totale [kgf/m ²]										
GCH 003540	0,98	1,1	2830	69	238	236	234	231	228	221	213	204	195	185	170

$$\left[\frac{m^3}{h} \right] = \left[\frac{m^3}{min} \right] \cdot 60$$

$$[Pa] = \left[\frac{kgf}{m^2} \right] \cdot 9,807$$

Da tale tabella è stata ricavata la curva caratteristica del ventilatore ivi riportata (fig. 3.7).

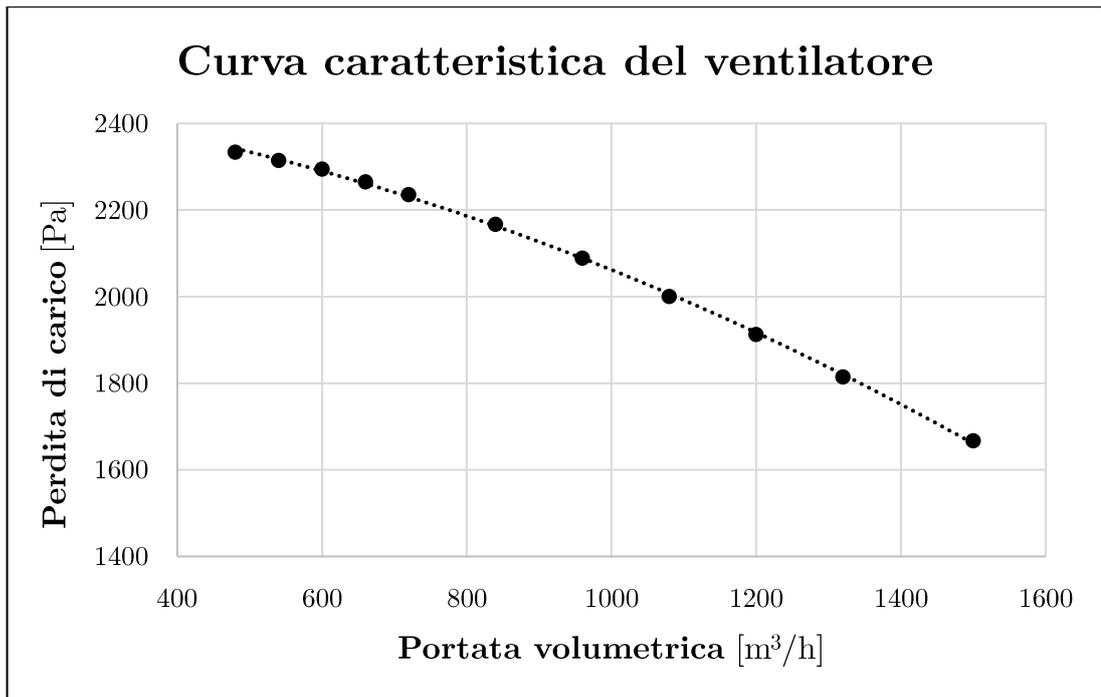


Figura 3.7: Curva caratteristica del ventilatore.

3.2.2 Flangia tarata

La flangia tarata è uno strumento utilizzato per le misure di portata dei fluidi. Nell'impianto descritto in precedenza essa è posizionata a valle del ventilatore, separata da esso da una lunghezza sufficiente a far sviluppare il moto del fluido. Il suo funzionamento si basa sull'effetto Venturi che è a sua volta una conseguenza dell'equazione di Bernoulli.

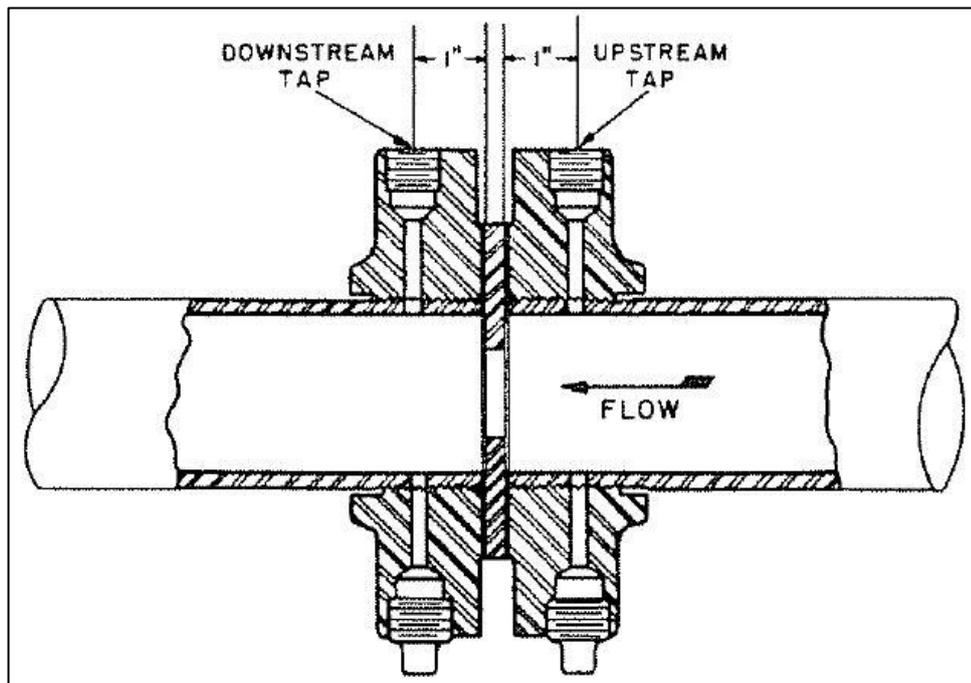


Figura 3.8: Flangia tarata, sezione longitudinale.

La flangia tarata è costituita da due sezioni circolari di tubo, assicurate l'una all'altra tramite una flangiatura, separate da sottile placca metallica di diametro inferiore a quello dei due tubi. La luce della placca metallica, denominata *diaframma*, causa una perdita di carico concentrata nel tubo, limitando la portata che vi può fluire. Misurando tale perdita di carico ai capi del diaframma è possibile risalire alla portata massica di fluido che sta transitando nel canale.

La normativa di riferimento per l'utilizzo della flangia tarata è la ISO 5617; le parti 1 e 2 della normativa stessa contengono precise specifiche di installazione. Tale normativa esplica la fondamentale importanza risiedente nel completo sviluppo del moto del fluido, sia a monte che a valle della flangia tarata. È giusto quindi lasciare una lunghezza compresa fra i 10 e 20 diametri del tubo a monte della flangia, e di circa 5 diametri a valle della stessa. Nel caso considerato, la lunghezza del tubo che precede la flangia è compresa tra i 10 e i 20 diametri, mentre il tubo che segue la flangia è lungo più dei 5 diametri richiesti dalla normativa. Tuttavia, prima di introdurre la relazione matematica per il calcolo della portata in massa del fluido occorre definire alcune grandezze caratteristiche dello strumento:

- D è il diametro interno del tubo [mm];
- d è il diametro interno dell'orifizio [mm];
- $\beta = d/D$ è il rapporto tra il diametro dell'orifizio e del tubo [ad.];
- Re_D è il numero di Reynolds del tubo [ad.];
- p_1 è la pressione a monte dell'orifizio [Pa];
- p_2 è la pressione a valle dell'orifizio [Pa];
- ρ_1 è la densità del fluido a valle dell'orifizio $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$;
- k è il coefficiente di isoentropica del fluido [ad.].

La relazione che permette di calcolare la portata di fluido è la seguente (eq. 3.1):

$$q_m = \frac{C}{\sqrt{1 - \beta^4}} \varepsilon \frac{\pi}{4} d^2 \sqrt{2\Delta p \rho_1} \quad (3.1)$$

dove:

- q_m è la portata in massa del fluido $\left[\frac{kg}{s}\right]$;
- C è il coefficiente di scaricamento, tabulato in funzione di D , β e Re_D [ad.];
- ε è il fattore di espansione, tabulato in funzione di k , β e $\left(\frac{p_2}{p_1}\right)$ [ad.].

Una corretta installazione dello strumento dovrebbe essere seguita da una calibrazione che ne attesti il corretto funzionamento, comprensiva di verifica dei risultati riportati. È stata quindi effettuata la misurazione in più punti, tramite un

anemometro a filo caldo, della velocità del fluido all'uscita del condotto. Tale misura è stata mediata sulla sezione del condotto e se n'è tratto un valore di portata tramite la formula riportata (eq. 3.2):

$$q_m = \rho_1 V_m l^2 \quad (3.2)$$

dove:

- V_m è la velocità media del fluido nel canale $\left[\frac{m}{s}\right]$;
- l è il lato della sezione del canale [m];

Dal confronto dei risultati si è avuta conferma della corretta calibrazione dello strumento.

Dal calcolo della q_m è semplice desumere il valore della velocità Darciana del fluido all'interno del canale, tramite l'eq. 3.3:

$$u = \frac{q_m}{\rho A} \quad (3.3)$$

3.2.3 Manometri differenziali



Figura 3.9: VelociCalc 8386A.

Lo strumento (fig. 3.9) utilizzato per misurare la caduta di pressione ai capi dell'orifizio tarato è un VelociCalc® Plus Multi-Parameter Ventilation Meter modello 8386A della TSI.

Tale strumento è stato collegato tramite due tubi di gomma alle prese di pressione in corrispondenza della flangia tarata, mostrando sullo schermo il valore della misura, il quale viene riportato manualmente nel programma utilizzato, per il relativo calcolo della portata in massa del fluido. Il manometro riesce a misurare una pressione differenziale massima di 3735 Pa e presenta, inoltre, una risoluzione di 1 Pa con una precisione del $\pm 1\%$ sulla lettura effettuata. Il VelociCalc 8386A possiede anche un rilevatore capace di misurare la temperatura con una risoluzione di $0,1^\circ\text{C}$, come indicato dalla scheda tecnica dello strumento.

Lo strumento (fig. 3.10) utilizzato per misurare la caduta di pressione ai capi dell'orifizio tarato è un DP-Calc™ Micromanometer 8710 della TSI.

Questo strumento viene collegato tramite due tubi di gomma alle prese



Figura 3.10: Manometro differenziale TSI-DPCalc 8710.

di pressione poste ai capi del provino inserito nel canale e riporta sullo schermo il valore della misura, il quale viene riportato manualmente nel programma utilizzato per l'elaborazione dei dati. Il misuratore riesce a rilevare una pressione differenziale massima di 3735 Pa, inoltre presenta una risoluzione di 0,001 Pa e una precisione del $\pm 2\%$ sulla lettura effettuata.

3.2.4 Calibro digitale

Per le misurazioni di lunghezza è stato utilizzato un calibro digitale. Ogni misurazione di una grandezza lineare, come il diametro dei tubi, le dimensioni dei provini di schiuma metallica, il diametro dei canali o lo spessore di parete dei canali aereali, è stata effettuata utilizzando tale strumento.



Figura 3.11: Calibro digitale.

La risoluzione dello strumento (fig. 3.11) è di 0,01mm.

3.2.5. Bilancia



Figura 3.12: Bilancia da laboratorio RADWAG 220.R2.

Per le misurazioni di massa è stata utilizzata una bilancia analitica da laboratorio RADWAG AS 220.R2 (fig 3.12).

Le misurazioni hanno prevalentemente interessato campioni di schiuma metallica, con lo scopo di calcolarne con maggior precisione possibile la porosità ed altre caratteristiche strutturali e morfologiche.

Tale strumento presenta un intervallo di misurazione da una pesata minima di 10 mg fino ad una massima di 220 g, con una risoluzione di 1 mg.

3.3 Analisi dell'Errore

3.3.1 Introduzione

Una parte fondamentale della trattazione risiede nella corretta valutazione dell'errore commesso durante le numerose misurazioni e calcoli effettuati. Come è noto, l'errore è una componente imprescindibile di una misurazione, indipendentemente dalla precisione degli strumenti utilizzati o dal rigore osservato durante l'esperienza sperimentale, i quali, tuttavia, sicuramente ne riducono l'entità, permettendo una più corretta valutazione dei risultati.

Di seguito verranno riproposti in maniera schematica gli errori relativi ai principali strumenti di misura utilizzati, utili per il calcolo sia dell'errore delle grandezze misurate sia per il calcolo dell'errore delle grandezze derivate, con particolare attenzione alla propagazione dell'errore all'interno dei calcoli, seguendo le indicazioni ed i riferimenti citati nel manuale *Theory and Design for Mechanical Measurements*.³

Per le misurazioni sperimentali è grandemente accettata un'incertezza media sulla misura del 5%, principalmente dovuta ad *errori accidentali* o *aleatori*, i quali ne determinano un'incontrollabile oscillazione intorno al "valore reale".

L'entità dell'incertezza, per sua stessa definizione, determina il campo d'errore nel quale il valore della grandezza riportata può oscillare; la ristrettezza di questo campo determina una maggiore precisione analitica e capacità predittiva dell'andamento. In un campo d'errore esageratamente grande, al contrario, la capacità di ricavare o predire un andamento basandosi unicamente sui dati sperimentali viene fortemente limitata, in quanto le grandezze misurate possono oscillare liberamente all'interno del campo d'incertezza, impedendo di stabilire se fra di esse sussista una qualsivoglia tendenza. Con l'analisi che verrà esplicitata successivamente si vuole quantificare l'effettiva incertezza di misurazione delle grandezze utilizzate nella trattazione del caso studio.

3.3.2 Metodo per il calcolo dell'errore casuale

Il metodo proposto segue le indicazioni fornite dal manuale sopracitato, con particolare riferimento alla sezione sugli **Errori Casuali**, detti anche *random errors*:

“Quando vengono ripetute diverse misurazioni di una data grandezza, mantenendo certe condizioni operative, si possono manifestare *errori casuali*, sotto forma di dispersione delle grandezze misurate. L'errore casuale viene introdotto attraverso la ripetibilità e la risoluzione dei componenti del sistema di misurazione, nonché della

³ Figliola, R.S.; Beasley, D.E., “*Theory and Design for Mechanical Measurements, 5th ed.*”, John Wiley & Sons Inc., pp.169-175, (2011)

procedura di acquisizione dei dati. La stessa variazione delle proprietà temporali e spaziali della variabile ne provoca lo scostamento casuale dal valor medio, assieme alle variazioni, anche minuscole, delle condizioni operative e di processo. Una stima del *range* dell'errore incidentale è data dalla sua incertezza casuale. L'*incertezza casuale standard* $s_{\bar{x}}$, è definita dall'intervallo dato da $\pm s_{\bar{x}}$, dove:

$$s_{\bar{x}} = s_x / \sqrt{N} \quad (3.4)$$

Dove s_x rappresenta la *deviazione standard* del set di N dati.”

3.3.2.1 Errore sul calcolo della sezione del provino

L'area della sezione è stata calcolata moltiplicando semplicemente le misure dei due lati, ottenute tramite una media dei risultati di quattro misurazioni effettuate con il calibro digitale mostrato precedentemente (fig. 3.11). Come appena descritto, l'incertezza su tali misure deriva dalla *deviazione standard* delle misurazioni, diviso la radice del numero di prove.

A titolo esemplificativo si propone il seguente calcolo:

Ricordando che $N = 4$,

$$\text{misure lato1: } \{89,62; 90,03; 88,54; 90,52\} \quad \sigma_1 = 89,68;$$

$$\text{misure lato2: } \{93,54; 94,35; 93,93; 93,85\} \quad \sigma_2 = 93,92;$$

$$s_{\text{lato}_1} = 0,84287 \Rightarrow s_{\bar{x}_1} = 0,421435;$$

$$s_{\text{lato}_2} = 0,33381 \Rightarrow s_{\bar{x}_2} = 0,166905;$$

Se si calcola l'incertezza relativa percentuale sulla misura dei due lati si ottiene:

$$e_1 = s_{\bar{x}_1} / \sigma_1 = 0,47\%;$$

$$e_2 = s_{\bar{x}_2} / \sigma_2 = 0,17\%;$$

Sommandole, si ottiene un valore che approssima l'incertezza sul calcolo dell'area.

$$e_A = e_1 + e_2 \sim \mathbf{0,7\%}$$

3.3.3 Metodo per il calcolo della propagazione degli errori

Il metodo proposto segue le indicazioni fornite dal manuale sopracitato, con particolare riferimento alla sezione sulla **Propagazione degli Errori**:

“Un metodo generale per l'espressione di una relazione fra un parametro dipendente y ed uno indipendente x è la dicitura $y = f(x)$. Supponiamo ora di misurare x un certo numero di volte in certe condizioni operative per stabilirne il

valor medio e la sua incertezza, in parte dovuta ad *errori casuali*, indicata con la dicitura $t_{v,P}S_{\bar{x}}$, o semplicemente $tS_{\bar{x}}$.

Trascurando quindi l'influenza di altri errori, *casuali* o *sistematici* che siano, si sa che il vero valore di x giace nell'intervallo $\bar{x} \pm tS_{\bar{x}}$. È dunque ragionevole assumere che il vero valore del parametro dipendente $y = f(x)$ cada nell'intervallo $\bar{y} \pm \delta y = f(\bar{x} \pm tS_{\bar{x}})$.

Espandendolo con la serie di Taylor risulta:

$$\bar{y} \pm \delta y = f(\bar{x}) \pm \left[\left(\frac{dy}{dx} \right)_{x=\bar{x}} tS_{\bar{x}} + \frac{1}{2} \left(\frac{d^2y}{dx^2} \right)_{x=\bar{x}} (tS_{\bar{x}})^2 + \dots \right] \quad (3.5)$$

Una stima approssimata di δy , rappresentato dal termine fra parentesi quadre, può essere fatta ponendo:

$$\delta y \approx \left(\frac{dy}{dx} \right)_{x=\bar{x}} tS_{\bar{x}} \quad (3.6)$$

ovvero trascurando tutti gli ordini superiori a 1 nell'espansione tramite Taylor.

Il termine derivativo, $(dy/dx)_{x=\bar{x}}$, rappresenta la pendenza della linea passante per il punto \bar{x} . Per piccole variazioni dal valore di \bar{x} , la pendenza approssima in maniera soddisfacente la relazione fra $tS_{\bar{x}}$ e δy . Il termine derivativo, a questo punto, rappresenta la sensibilità di y alle piccole variazioni di x . In generale, si può applicare quest'analisi agli errori che contribuiscono all'incertezza del parametro x , espressa come u_x . L'incertezza su x è correlata a quella su y in questo modo:

$$u_y = \left(\frac{dy}{dx} \right)_{x=\bar{x}} u_x \quad (3.7)$$

Questo metodo di valutazione può essere esteso a diverse relazioni, anche fra più variabili.

Si consideri ad esempio un risultato R , frutto di una relazione multivariabile fra le grandezze $x_1, x_2, x_3, \dots, x_L$, definita da:

$$R = f_1\{x_1, x_2, x_3, \dots, x_L\} \quad (3.8)$$

dove L rappresenta il numero di variabili indipendenti coinvolte nella relazione. Ogni variabile contiene un certo grado di incertezza che influenza il risultato. La miglior stima per vero valor medio R' sarebbe:

$$R' = \bar{R} \pm u_R \quad (3.9)$$

dove il valor medio di R è calcolato da:

$$R' = f_1\{\bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{x}_3, \dots, \bar{x}_L\} \quad (3.10)$$

e l'incertezza in \bar{R} è stata trovata da:

$$u_R = f_1\{u_{\bar{x}_1}, u_{\bar{x}_2}, \dots, u_{\bar{x}_L}\} \quad (3.11)$$

In cui ogni termine $u_{\bar{x}_i}$, con $i = 1, 2, \dots, L$ rappresenta l'incertezza associata all' i -esimo parametro x . La u_R riflette il contributo di ogni singola incertezza e della sua propagazione all'interno del risultato finale. Può, in tal senso, essere definito un indice generale di sensibilità θ_i può essere espresso come:

$$\theta_i = \frac{\partial R}{\partial x_{i_{x=\bar{x}}}} \quad i = 1, 2, \dots, L \quad (3.12)$$

Tale *indice di sensibilità* esprime come le variazioni di ciascuna x_i influenzino R .

Il passaggio dal continuo al discreto può essere completato valutando l'incertezza u_R tramite il metodo delle differenze finite. L'indice può pertanto essere calcolato utilizzando i valori medi nominali delle grandezze o, in mancanza di questi, adoperando delle adeguate stime di tali valori.

Il contributo dell'incertezza di x sul risultato R è rappresentato dal termine $\theta_i u_{\bar{x}_i}$. La stima più accurata e generalmente accettata di u_R è data da:

$$u_R = \left[\sum_{i=1}^L (\theta_i u_{\bar{x}_i})^2 \right]^{1/2} \quad i = 1, 2, \dots, L \quad (3.13)$$

3.3.3.1 Errore sul calcolo della portata in massa

Si applica il metodo appena descritto per calcolare l'errore sulla portata massica di fluido nel canale. Ricordando l'equazione precedente (eq. 3.1):

$$\begin{aligned} q_m &= \frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}} \varepsilon \frac{\pi}{4} d^2 \sqrt{2\Delta p \rho_1} = \frac{K}{\sqrt{1-\left(\frac{d}{D}\right)^4}} d^2 \sqrt{\Delta p \cdot \rho_1} \\ &= \frac{K}{\sqrt{1-\left(\frac{x_1}{x_2}\right)^4}} x_1^2 \sqrt{x_3 \cdot x_4} \end{aligned} \quad (3.14)$$

Procedendo per semplice sostituzione si ha:

- x_1 che rappresenta il diametro interno dell'orifizio tarato, d ;
- x_2 che rappresenta il diametro interno del tubo, D ;
- x_3 che rappresenta la caduta di pressione ai capi dell'orifizio tarato, Δp ;
- x_4 che rappresenta la densità del fluido nel canale a valle dell'orifizio, ρ_1 .

Si procede come descritto dalla procedura:

$$y = \frac{K}{\sqrt{1 - \left(\frac{x_1}{x_2}\right)^4}} x_1^2 \sqrt{x_3 \cdot x_4} \quad (3.15)$$

Calcolando le successive derivate:

$$\frac{1}{y} \frac{\partial y}{\partial x_1} = \frac{2}{x_1 \left[1 - \left(\frac{x_1}{x_2}\right)^4\right]} \quad (3.16);$$

$$\frac{1}{y} \frac{\partial y}{\partial x_2} = \frac{-2x_1^4}{x_2^5 \left[1 - \left(\frac{x_1}{x_2}\right)^4\right]} \quad (3.17);$$

$$\frac{1}{y} \frac{\partial y}{\partial x_3} = \frac{1}{2x_3} \quad (3.18);$$

$$\frac{1}{y} \frac{\partial y}{\partial x_4} = \frac{1}{2x_4} \quad (3.19);$$

trovate queste, si inseriscono nell'equazione 3.13:

$$u_R = \sqrt{\left(\frac{\partial y}{\partial x_1} \frac{u_{x_1}}{y}\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial x_2} \frac{u_{x_2}}{y}\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial x_3} \frac{u_{x_3}}{y}\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial x_4} \frac{u_{x_4}}{y}\right)^2} \quad (3.20)$$

Le incertezze u_{x_1} ed u_{x_2} sono entrambe pari a 0,00001 m.

L'incertezza relativa della misura di pressione è invece pari all'1%.

Riprendendo la stessa equazione:

$$\begin{aligned} & u_R \\ = & \sqrt{\left(\frac{2}{x_1 \left[1 - \left(\frac{x_1}{x_2}\right)^4\right]} u_{x_1}\right)^2 + \left(\frac{-2x_1^4}{x_2^5 \left[1 - \left(\frac{x_1}{x_2}\right)^4\right]} u_{x_2}\right)^2 + \left(\frac{1}{2x_3} u_{x_3}\right)^2 + \left(\frac{1}{2x_4} u_{x_4}\right)^2} \\ = & \sqrt{4 \left(\frac{0,00001}{0,07 \left[1 - \left(\frac{0,07}{0,12}\right)^4\right]}\right)^2 + 4 \left(\frac{0,07^4 \cdot 0,00001}{0,12^5 \left[1 - \left(\frac{0,07}{0,12}\right)^4\right]}\right)^2 + \frac{1}{4} (0,01)^2 + \frac{1}{4} \left(\frac{0,0004}{2 \cdot 1,18648}\right)^2} \\ = & \end{aligned}$$

$$= \sqrt{1,04 \cdot 10^{-7} + 1,2 \cdot 10^{-10} + 2,5 \cdot 10^{-5} + 2,9 \cdot 10^{-9}} \sim \mathbf{0,6\%}$$

Appare chiaro come il termine dominante nel calcolo dell'errore sulla portata sia l'incertezza sulla misura della pressione, la quale, sebbene sia presente sotto radice quadrata nella formula per il calcolo della portata, è di entità molto superiore rispetto alle altre incertezze, ben al di sotto dell'1%. La stessa procedura è stata applicata alle altre grandezze calcolate, come esposto seguentemente.

3.3.3.2 Errore sul calcolo della velocità

Similmente a quanto detto in precedenza, sia per quanto riguarda il calcolo della velocità (eq. 3.3), sia per quanto riguarda il calcolo dell'incertezza, si procede come segue:

$$u = q_m / \rho A = x_1 / (x_2 \cdot x_3) \quad (3.21)$$

$$\frac{1}{y} \frac{\partial y}{\partial x_1} = \frac{1}{x_1}; \quad (3.22)$$

$$\frac{1}{y} \frac{\partial y}{\partial x_2} = -\frac{1}{x_2}; \quad (3.23)$$

$$\frac{1}{y} \frac{\partial y}{\partial x_3} = -\frac{1}{x_3}; \quad (3.24)$$

$$u_R = \sqrt{\left(\frac{1}{x_1} u_{x_1}\right)^2 + \left(-\frac{1}{x_2} u_{x_2}\right)^2 + \left(-\frac{1}{x_3} u_{x_3}\right)^2} =$$

$$= \sqrt{(0,006)^2 + \left(\frac{0,0004}{1,18648}\right)^2 + (0,007)^2} \sim \mathbf{1,0\%}$$

3.3.3.3 Errore sul calcolo delle perdite di carico per unità di lunghezza

Dal valore di perdita di carico si calcolano diverse grandezze, correlate fra loro da una diversa dipendenza dalla velocità. Partendo dalla formula per il calcolo della perdita di carico per unità di lunghezza si procede come segue, similmente a quanto già esposto:

$$\frac{dp}{dz} = \frac{\Delta P}{t} \quad (3.25)$$

dove ΔP è la perdita di carico ai capi del provino di schiume metalliche e t è lo spessore del provino di schiume metalliche.

$$\frac{dp}{dz} = y = \frac{x_1}{x_2}; \quad (3.26)$$

$$\frac{1}{y} \frac{\partial y}{\partial x_1} = \frac{1}{x_1}; \quad (3.27)$$

$$\frac{1}{y} \frac{\partial y}{\partial x_2} = -\frac{1}{x_2}; \quad (3.28)$$

$$u_R = \sqrt{\left(\frac{1}{x_1} u_{x_1}\right)^2 + \left(-\frac{1}{x_2} u_{x_2}\right)^2} = \sqrt{(0,02)^2 + \left(-\frac{0,00001}{0,02024}\right)^2} \sim 2,0\%$$

Dato che, tuttavia, non si tratta dell'unica grandezza derivata dalla perdita di carico ΔP , si presentano in questa sezione anche i calcoli per le incertezze delle successive grandezze, rispettivamente $\frac{dp}{dz} \frac{1}{u}$ e $\frac{dp}{dz} \frac{1}{u^2}$.

$$\frac{dp}{dz} \frac{1}{u} = \frac{\Delta P}{t} \cdot \frac{\rho A}{q_m} \quad (3.29)$$

Da cui, per semplice sostituzione, come già illustrato precedentemente:

$$\frac{dp}{dz} \frac{1}{u} = y = \frac{x_1}{x_2} \cdot \frac{x_3 \cdot x_4}{x_5}; \quad (3.30)$$

$$\frac{1}{y} \frac{\partial y}{\partial x_1} = \frac{1}{x_1}; \quad (3.31)$$

$$\frac{1}{y} \frac{\partial y}{\partial x_2} = -\frac{1}{x_2}; \quad (3.31)$$

$$\frac{1}{y} \frac{\partial y}{\partial x_3} = \frac{1}{x_3}; \quad (3.32)$$

$$\frac{1}{y} \frac{\partial y}{\partial x_4} = \frac{1}{x_4}; \quad (3.33)$$

$$\frac{1}{y} \frac{\partial y}{\partial x_5} = -\frac{1}{x_5}; \quad (3.34)$$

$$u_R = \sqrt{\left(\frac{1}{x_1} u_{x_1}\right)^2 + \left(-\frac{1}{x_2} u_{x_2}\right)^2 + \left(\frac{1}{x_3} u_{x_3}\right)^2 + \left(\frac{1}{x_4} u_{x_4}\right)^2 + \left(-\frac{1}{x_5} u_{x_5}\right)^2} =$$

$$= \sqrt{(0,02)^2 + \left(-\frac{0,00001}{0,02024}\right)^2 + \left(\frac{0,0004}{1,18648}\right)^2 + (0,007)^2 + (0,006)^2} \sim \mathbf{2,2\%}$$

Infine, come già annunciato:

$$\frac{dp}{dz} \cdot \frac{1}{\rho u^2} = \frac{\Delta P}{t} \cdot \frac{1}{\rho} \cdot \left(\frac{\rho A}{q_m}\right)^2 = \frac{\Delta P}{t} \cdot \frac{\rho A^2}{q_m^2} \quad (3.35)$$

Da cui, per semplice sostituzione, come già illustrato precedentemente:

$$\frac{dp}{dz} \cdot \frac{1}{\rho u^2} = y = \frac{x_1}{x_2} \cdot \frac{x_3 \cdot x_4^2}{x_5^2} \quad (3.36)$$

$$\frac{1}{y} \frac{\partial y}{\partial x_1} = \frac{1}{x_1}; \quad (3.37)$$

$$\frac{1}{y} \frac{\partial y}{\partial x_2} = -\frac{1}{x_2}; \quad (3.38)$$

$$\frac{1}{y} \frac{\partial y}{\partial x_3} = \frac{1}{x_3}; \quad (3.39)$$

$$\frac{1}{y} \frac{\partial y}{\partial x_4} = \frac{2}{x_4}; \quad (3.40)$$

$$\frac{1}{y} \frac{\partial y}{\partial x_5} = -\frac{2}{x_5}; \quad (3.41)$$

$$u_R = \sqrt{\left(\frac{1}{x_1} u_{x_1}\right)^2 + \left(-\frac{1}{x_2} u_{x_2}\right)^2 + \left(\frac{1}{x_3} u_{x_3}\right)^2 + \left(\frac{2}{x_4} u_{x_4}\right)^2 + \left(-\frac{2}{x_5} u_{x_5}\right)^2} =$$

$$= \sqrt{(0,02)^2 + \left(-\frac{0,00001}{0,02024}\right)^2 + \left(\frac{0,0004}{1,18648}\right)^2 + 4 \cdot (0,007)^2 + 4 \cdot (0,006)^2} \sim \mathbf{2,7\%}$$

Come si può evincere dai risultati riportati, suddivisi per tipo di grandezza analizzata, l'incertezza sulla misura e sul calcolo non supera mai il 5%, fermandosi ad un 3% massimo circa. L'entità di quest'incertezza consente sicuramente un'analisi sufficientemente precisa dei risultati sperimentali, dato che sta al di sotto

della soglia del 5%, riportata precedentemente come il limite di soglia tipico delle misurazioni sperimentali.

Capitolo IV: Risultati sperimentali

4.1 Precisazioni sul modello teorico

Il modello teorico utilizzato nella trattazione di questo caso studio è basato sulla legge di Darcy-Forchheimer; è necessario ricordare le equazioni (eqq. 2.6 & 2.9), entrambe rappresentanti lo stesso regime di moto:

$$\frac{\mu}{k} \cdot \left(1 + \frac{\rho \cdot f \cdot \sqrt{k}}{\mu} |u| \right) u = -\nabla p + F \quad (2.6)$$

$$-\frac{dp}{dz} = \frac{\mu}{k} \cdot u + \frac{f \cdot \rho}{\sqrt{k}} \cdot u^2 \quad (2.9)$$

In tal caso si opera qualche passaggio sulla 2.9, mostrando tramite semplici operazioni matematiche, la relazione intercorrente fra i due membri dell'equazione e la grandezza fisica velocità Darciana. Nel caso in questione, prendendo la 2.9 e dividendola per la velocità Darciana u si ottiene:

$$-\frac{dp}{dz} \cdot \frac{1}{u} = \frac{\mu}{k} + \frac{f \cdot \rho}{\sqrt{k}} \cdot u = a + b \cdot u \quad (4.1)$$

L'equazione 4.1 è la linearizzazione dell'equazione precedente (eq. 2.9) rispetto alla velocità, mettendo in evidenza la diseguale dipendenza nei confronti del parametro velocità da parte dei due termini del secondo membro dell'equazione. a e b rappresentano ora, rispettivamente il termine noto "viscoso" e il coefficiente angolare "inerziale" della retta.

Si definiscono ora alcuni parametri fluidodinamici utilizzati in questa trattazione, la cui formula è basata appunto sugli a e b appena definiti:

$$k = \frac{\mu}{a} \quad (4.2) \quad f = \frac{b \cdot \sqrt{k}}{\rho} \quad (4.3) \quad C = \frac{b}{\rho} \quad (4.4)$$

dove:

- k rappresenta la permeabilità del mezzo poroso [m^2];
- f rappresenta il coefficiente inerziale del mezzo poroso [*ad.*];
- C rappresenta il *form-drag coefficient* [m^{-1}].

Solo attraverso la linearizzazione dell'equazione di Darcy-Forchheimer è possibile ottenere questo insieme di dati. Questi parametri, assieme ad altri risultati sperimentali, verranno riproposti nella trattazione dei risultati ottenuti e sono stati calcolati per ogni singola prova di perdita di carico eseguita.

4.2 Metodo di acquisizione dati

4.2.1 Procedura preliminare

Per ogni singola prova effettuata in laboratorio è stata seguita la stessa procedura, cercando di completare l'intero processo di acquisizione dati nella maniera più rigorosa possibile.

In primo luogo, è stata stabilita una serie di valori di perdita di carico al diaframma, i quali come è stato mostrato attraverso la relazione (3.1), corrispondono ad un preciso valore di portata d'aria. Il valore di perdita di carico al diaframma è stato misurato utilizzando il manometro differenziale VelociCalc 8386A, regolando, tramite l'*inverter* collegato alla rete, la potenza fornita al ventilatore, e quindi anche la portata d'aria sospinta nel canale. Stabilita la perdita di carico alla flangia tarata è possibile calcolare di conseguenza anche la portata massica del fluido e quindi la sua velocità, attraverso la semplice equazione 3.3, qui riproposta:

$$u = \frac{q_m}{\rho A} \quad (3.3)$$

dove A rappresenta l'area frontale del mezzo poroso [m^2].

Una volta stabiliti i valori di portata d'aria con cui operare durante la realizzazione dell'esperimento si deve realizzare un provino di schiuma metallica da inserire all'interno del canale per testarne il comportamento fluidodinamico. Sulla costruzione del campione di schiuma da testare occorre precisare qualche dettaglio procedurale e costruttivo, necessario per la ripetibilità dell'esperimento.

Le schiume metalliche, precedentemente citate in tabella 1.1, sono state manifatturate in modo da essere uguali fra loro; fabbricate con lo stesso materiale, la stessa porosità, numero di PPI e tagliate con le stesse dimensioni geometriche. Prima di inserirle nel canale ed effettuare le prove sperimentali è stato tuttavia necessario misurare con precisione le dimensioni geometriche utilizzando il calibro digitale citato fra gli strumenti di misura, calcolando una media fra diverse misurazioni, con lo scopo di ottenere un valore preciso della sezione frontale di ogni campione di schiuma, così come del suo spessore. Ottenuti i valori di area e volume dei provini, il passaggio successivo è stato di servirsi di una bilancia di precisione per calcolare autonomamente il valore di porosità delle schiume metalliche. I risultati di questa misurazione sono stati poi raccolti (tab. 4.1).

Tabella 4.1: Risultati delle misurazioni preliminari.

Nome	Lato 1	Lato 2	Spessore	Area	<i>m</i> reale	Densità	<i>m</i> teor.	Poros. ϕ
	[mm]	[mm]	[mm]	[cm ²]	[g]	[kg/m ³]	[g]	[%]
<i>Provino n°1</i>	91,84	95,68	21,06	87,88	16,9	2650	48,03	0,965
<i>Provino n°2</i>	91,75	94,85	20,91	87,03	16,4	2650	48,24	0,966
<i>Provino n°3</i>	92,08	94,38	21,09	86,90	16,6	2650	48,82	0,966
<i>Provino n°4</i>	93,72	91,58	20,77	85,83	16,5	2650	45,83	0,964
<i>Provino n°5</i>	90,72	95,28	21,03	86,43	17,7	2650	49,17	0,964
<i>Provino n°6</i>	95,50	91,80	20,95	87,66	16,7	2650	49,12	0,966
<i>Provino n°7</i>	89,68	93,92	20,64	84,22	16,5	2700	46,94	0,965
<i>Provino n°8</i>	90,60	94,04	20,24	85,20	17,1	2700	46,56	0,966

Nome	Lato 1	Lato 2	Spessore	Area	<i>m</i> reale	Densità	<i>m</i> teor.	Poros. ϕ
	[mm]	[mm]	[mm]	[cm ²]	[g]	[kg/m ³]	[g]	[%]
<i>Provino n°10</i>	92,06	86,91	38,38	80,01	83,77	~8200	1363,45	93,9%
<i>Provino n°11</i>	92,30	93,34	19,60	86,17	93,51	~8200	1389,54	93,3%
<i>Provino n°12</i>	89,99	93,06	20,23	83,75	119,74	~8200	1470,50	91,8%

Fra le varie schiume analizzate si può notare una certa omogeneità nei risultati di porosità, anche rispetto al valore dichiarato dal costruttore ($\phi=0,965$). Si può quindi ipotizzare, in maniera del tutto preliminare, un comportamento fluidodinamico simile fra le stesse, una volta inserite nel canale ed effettuate le dovute prove di perdite di carico.

Il passaggio successivo consiste nel costruire un adeguato supporto, che consenta di inserire all'interno del tubolare dell'apparato le schiume metalliche; disposte singolarmente oppure riunite in pacchi. Il problema sta nel creare delle condizioni al contorno del provino che impediscano lo scavalco del provino da parte

dell'aria, con conseguente invalidamento dei risultati di pressione differenziale e quindi della totalità della prova sperimentale. La soluzione adottata consiste in un rivestimento di nastro adesivo rinforzato, che impedisca all'aria di entrare dalla sezione frontale della schiuma e di fuoriuscirvi prima di aver oltrepassato l'intero spessore del provino, unito ad un rivestimento di nastro gommato, incollato all'esterno, in modo da completare la sigillatura del pacco di schiume, rendendo impossibile lo scavalco del provino *in toto*. Ciò è utile soprattutto quando si sovrappongono più schiume, le quali, generando una considerevole resistenza al passaggio dell'aria, costringerebbero il fluido al suddetto scavalco. In tali casi, per completare la sigillatura, si è provveduto a contornare il pacco di schiume con uno strato di silicone acetico, avendo cura di non “sporcare” la schiuma, occludendone i pori (figg. 4.1 & 4.2):



Figura 4.1: Esempio di guarnizione esterna al provino di schiuma.

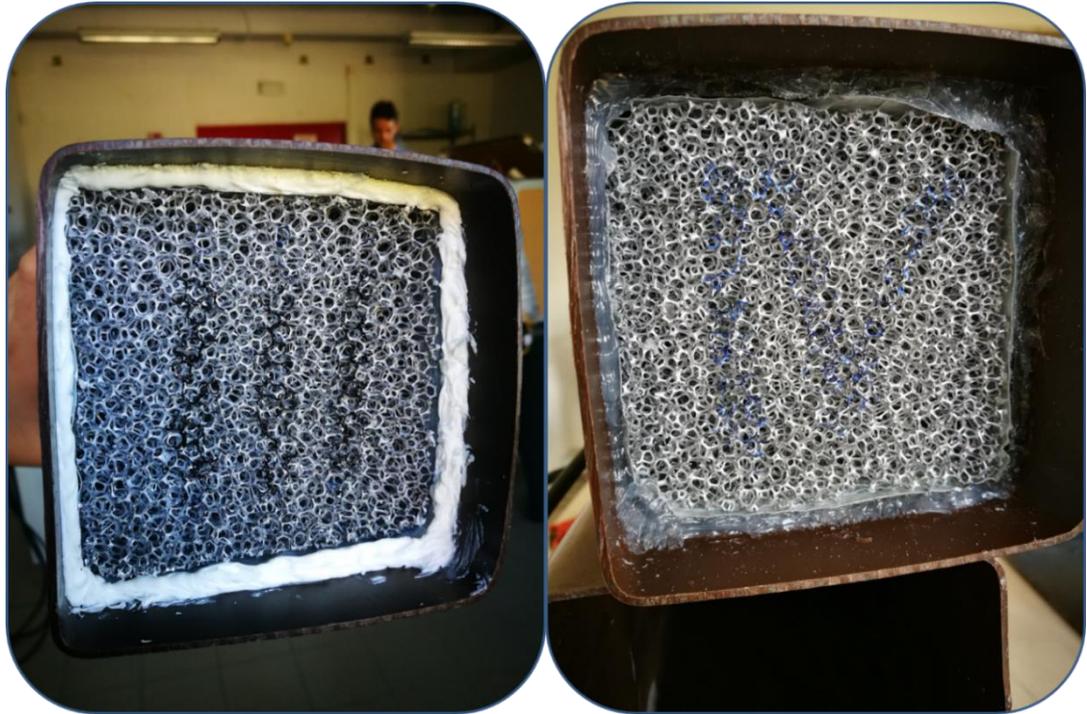


Figura 4.2: Due esempi di siliconatura effettuati sui provini inseriti nel canale.

Assicuratisi che la costruzione del provino di schiume metalliche non presenti difetti concettuali che ne potrebbero inficiare il comportamento in sito d'esperienza allora è permesso proseguire con la raccolta dati vera e propria.

4.2.2 Esempio di raccolta dati

Una volta completate le procedure preparatorie alla prova sperimentale in questione, occorre collegare i manometri differenziali alle prese di pressione preposte per lo scopo; come già ripetuto: le prime in corrispondenza della flangia tarata, per regolare la portata d'aria, le seconde ai capi del provino di schiuma metallica, per misurare la perdita di carico effettiva, già raffigurato in alcune illustrazioni inserite precedentemente (figg. 3.4 & 3.9). Tali prese d'aria debbono essere opportunamente assemblate e fornite di guarnizioni resistenti al passaggio dell'aria, rimarcando il concetto già esposto in precedenza sulla costruzione di un canale isolato verso l'esterno.

Tramite l'*inverter* si imposta una determinata frequenza di uscita della corrente elettrica, direttamente collegata alla potenza entrante al dispositivo. Variando la velocità di rotazione delle pale del ventilatore si determinano diversi valori di perdita di carico al diaframma, dai quali si può calcolare altri parametri utili, come la portata in massa e la velocità del fluido. Il diaframma inserito nella flangia tarata è scelto in base al *range* di velocità in cui si può operare, in tal caso si è scelto un diaframma con diametro interno pari 0,07 m, adatto ad operare in un intervallo di velocità compreso fra 1,6 m/s e 8,4 m/s, giudicato sufficientemente ampio per il caso studio.

L'assemblaggio di provino di schiuma metallica, guarnito di nastro adesivo isolante, provoca una perdita di carico misurabile dal secondo manometro differenziale, la quale viene riportata manualmente nel programma di elaborazione dati. Fra gli aspetti caratteristici di questi mezzi porosi che sono stati indagati vi sono, senza pretesa di esaustività, la dipendenza della perdita di carico da vari parametri quali: l'orientamento dei provini all'interno del canale, dell'ordine delle schiume in un singolo pacco, del numero di schiume disposte in fila, etc.

Con scopo meramente esemplificativo, viene presentata nella pagina successiva una tabella di raccolta dati del tutto simile a quelle accumulate durante il processo di sperimentazione (tab. 4.2).

Tabella 4.2: Esempio di raccolta dati.

04/12/2018							
Schiume -->3+1+5+6+2-->, 100mm, Al-10 PPI							
ΔP diaframma [Pa]	ΔP provino [Pa]	Portata aria [kg/s]	(dp/dz) [Pa/m]	Vel. u [m/s]	$\left(\frac{dp}{dz}\right)\left(\frac{1}{u}\right)$ [Pa·s·m ⁻²]	$\left(\frac{dp}{dz}\right)\left(\frac{1}{u^2}\right)$ [Pa·s ² ·m ⁻³]	k [m ²]
20,0	31,9	0,017	303,7	1,68	181,0	107,9	9,96E-07
42,0	73,0	0,025	695,0	2,42	287,7	119,1	
72,0	124,4	0,033	1184,4	3,16	374,5	118,4	f [ad.]
112,0	194,0	0,041	1847,1	3,94	469,4	119,3	
160,0	274,9	0,049	2617,3	4,69	557,7	118,8	0,0887
216,0	365,9	0,057	3483,8	5,44	639,9	117,5	
280,0	471,8	0,064	4492,0	6,19	725,8	117,3	C [m ⁻¹]
351,0	589,8	0,072	5615,5	6,93	810,4	117,0	
430,0	718,9	0,080	6844,7	7,66	893,7	116,7	88,89
516,0	862,0	0,087	8207,2	8,38	979,4	116,9	
630,0	1077,3	0,096	10257,1	9,26	1107,4	119,6	
670,0	1160,3	0,099	11047,3	9,54	1158,0	121,4	

Temp. aria [°C]	21,6
Densità aria [kg/m ³]	1,198
Porosità media	0,965
Spessore schiuma [m]	0,105
Area frontale schiuma [m ²]	0,00869

Numero schiume	5
Viscosità dinamica μ [Pa·s]	1,828E-05
Viscosità cinematica ν [m ² /s]	1,526E-05
a [kg·m ⁻³ ·s ⁻¹]	18,35
b [kg·m ⁻⁴]	106,5

La tabella ivi proposta ha un valore puramente dimostrativo, quando invece la dissertazione sugli effettivi risultati ottenuti sarà proposta più avanti. La tabella, come si può notare, è organizzata in modo da riconoscere il tipo di schiume utilizzate per la prova i -esima, annotando al contempo la data in cui tale prova si è svolta, per poter rintracciare, a ritroso, eventuali problemi o malfunzionamenti

dell'apparato. Qui invece viene di seguito presentata una raccolta completa delle relazioni fisico-matematiche utilizzate per ricavare le grandezze presentate:

- ΔP_d è misurato tramite il man. differenziale ai capi della flangia [Pa];
- ΔP_p è misurato tramite il man. differenziale ai capi della schiuma [Pa];
- q_m è calcolata tramite la relazione descritta dall'eq. 3.1 [kg/s];
- u è calcolata tramite la relazione descritta dall'eq. 3.3 [m/s];
- t è lo spessore del pacchetto di schiume inserito nel canale [m];
- A è la sezione frontale della schiuma che incontra il fluido [m^2];
- \emptyset è la porosità media del pacchetto di schiume inserito nel canale [%].
- T_m è la temperatura media dell'aria che scorre nel canale [$^{\circ}C$];
- a e b sono calcolate tramite la relazione descritta dall'eq. 4.1;
- k , f e C sono invece calcolate tramite le eqq. 4.2, 4.3 & 4.4.

La relazione per calcolare invece la perdita di carico per unità di lunghezza si basa su:

$$\frac{dp}{dz} = \frac{\Delta P_p}{t}; \quad (4.5)$$

Dalla quale, banalmente, si ricavano le altre due, semplicemente dividendo per la velocità Darciana:

$$\frac{dp}{dz} \cdot \frac{1}{u} = \frac{\Delta P_p}{t} \cdot \frac{1}{u} \quad (4.6) \quad , \quad \frac{dp}{dz} \cdot \frac{1}{u^2} = \frac{\Delta P_p}{t} \cdot \frac{1}{u^2} \quad (4.7)$$

Infine, è doveroso precisare che le proprietà fisiche densità, viscosità dinamica e viscosità cinematica sono state calcolate a partire dalla temperatura del fluido, tenendo quindi conto delle seppur minime variazioni che tali proprietà attraversano quando muta la loro temperatura.

La densità del fluido è stata calcolata come:

$$\rho = \frac{101325}{287,058 \cdot (273 + T_{ext})}; \quad (4.8)$$

La viscosità dinamica μ è stata calcolata dalla relazione sperimentale:

$$\mu = \mu_0 \left(\frac{296,15 + 120}{(T_{ext} + 273,15) + 120} \right) \left(\frac{T_{ext} + 273,15}{296,15} \right)^{\frac{3}{2}}; \quad (4.9)$$

La viscosità cinematica è stata calcolata di conseguenza, dalla semplice relazione:

$$v = \frac{\mu}{\rho}; \quad (4.10)$$

4.3 Analisi dei risultati

4.3.1 Perdite di carico

In primo luogo, vengono presentati i risultati complessivi di perdita di carico dei campioni di schiuma metallica. La relazione data dalla legge di Darcy-Forchheimer (eq. 2.9) suggerisce che sussista una duplice dipendenza, sia lineare che quadratica, rispetto alla velocità. L'andamento lineare, relativo al regime di moto Darciano, può essere osservato a Re_k inferiori a 1, mentre, come già citato in precedenza, si può già osservare una transizione verso il regime di Forchheimer per $Re_k \geq 1$.

Come è noto, le perdite di carico vengono suddivise in due principali categorie: *distribuite* e *concentrate*, le prime sono proprie delle pareti dei canali aerulici e dipendono dalla lunghezza del tratto che il fluido percorre, mentre le seconde sono dovute ad accidentalità marcate, dovute a tortuosità del canale o ad elementi che disperdono l'energia di pressione del fluido, come valvole o strozzature di vario genere. Le schiume metalliche inserite nel canale appartengono a questa seconda categoria.

Utilizzando l'aria come fluido si ha l'enorme vantaggio di non dover allestire un circuito idraulico, in cui, tra le altre cose, occorrerebbe progettare un pratico sistema di sostituzione del provino di schiuma da testare, garantendo al contempo la tenuta stagna del circuito. Uno svantaggio di utilizzare aria sta tuttavia nel fatto di porsi in una condizione in cui è, per natura stessa dell'aria, difficile esplorare il regime di moto a Re bassi, dato che l'aria comincia a manifestare fenomeni di turbolenza già a velocità relativamente ridotte.

Ciò ci porta ad una semplice conclusione, dato che principalmente si andrà ad operare nel regime quadratico di Forchheimer piuttosto che in quello lineare di Darcy, la curva delle perdite di carico seguirà un andamento quadratico, in accordo con quanto appena affermato.

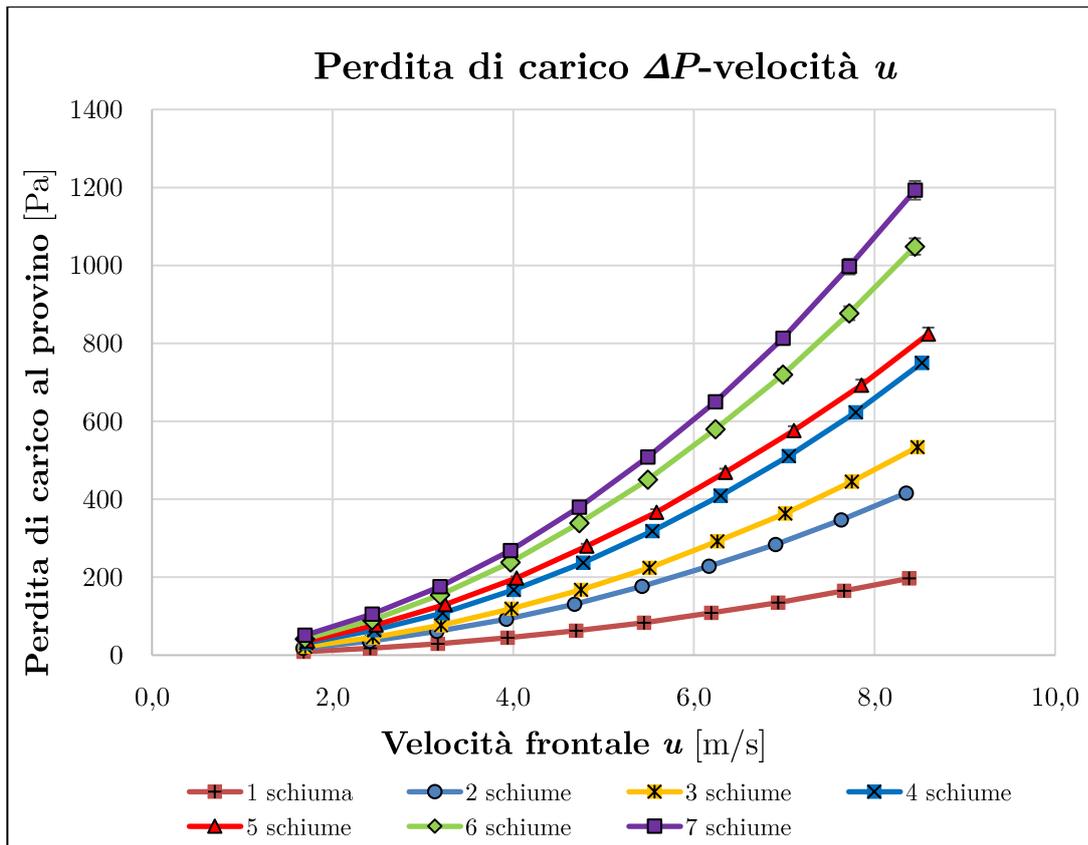


Figura 4. 3: Grafico $\Delta P - u$

Si precisa che la dicitura “ n schiume” sta a significare che il provino testato nel canale racchiudeva n schiume metalliche (tab. 4.1), impilate l’una sull’altra, come mostrato in precedenza (fig. 4.1). Naturalmente è possibile notare come, all’aumentare del numero di schiume impilate assieme a formare un provino, di pari passo crescano le perdite di carico associate, ma ciò non stupisce poiché il percorso che deve superare il filetto fluido diventa più tortuoso; infatti la tenuta all’aria sia del provino che del canale assumono fondamentale importanza in questi casi.

Le linee di tendenza mostrate nel grafico sono state ricavate da una media di tutte le prove effettuate, riunite per tipologia, ovvero per spessore del provino (ogni schiuma aggiuntiva rappresenta ulteriori 2 cm di schiuma metallica che il fluido deve superare).

4.3.1.1 Influenza dell’ordine delle schiume e della loro orientazione

Una delle prime verifiche compiute è stata la verifica della dipendenza delle perdite di carico da parametri quali l’ordine delle schiume all’interno di un provino. Ovvero, si è desiderato constatare se effettivamente due “pacchetti” costituiti dalle stesse schiume metalliche ma disposte in ordine diverso, possedesse lo stesso comportamento in relazione alle perdite di carico.

Ad esempio, qui viene mostrato (tab. 4.3) come la prova “1+2+3+4+5” possedga risultati di perdite di carico estremamente simili alla prova “4+1+3+2+5”, svoltasi

oltretutto in un giorno diverso. Come si può facilmente evincere, le misurazioni di caduta di pressione sono ampiamente contenute entro un cono d'errore del $\pm 5\%$, il quale è assolutamente normale per una misurazione sperimentale. Nel secondo gruppo di tabelle (tab. 4.4) si confrontano invece lo stesso set di schiume, ma invertendone l'orientazione (rappresentata dalla postposizione di "(2)" nel numero di schiume impilate assieme, in questo caso).

Tabella 4.3: Prove effettuate con i campioni di schiuma: 1, 2, 3, 4, 5.

18/09/2018		18/09/2018	
Schiume 1+2+3+4+5, 100mm, Al-10 PPI		Schiume 4+1+3+2+5, 100mm, Al-10 PPI	
Perdite di carico al diaframma [Pa]	Perdite di carico al provino [Pa]	Perdite di carico al diaframma [Pa]	Perdite di carico al provino [Pa]
20,0	39,3	20,0	39,6
42,0	81,8	42,0	80,7
72,0	137,4	72,0	137,0
112,0	211,0	112,0	212,0
160,0	300,0	160,0	298,0
216,0	404,0	216,0	401,0
280,0	520,0	280,0	515,0
351,0	646,0	351,0	643,0
430,0	793,0	430,0	790,0
516,0	947,0	516,0	942,0

Tabella 4.4: Prove effettuate con i campioni di schiuma: 1, 2, 3, 5.

25/09/2018		26/09/2018	
Schiume 5+3+2+1, 80mm, Al-10 PPI,		Schiume 5+3+2+1 (2), 80mm, Al-10 PPI	
Perdite di carico al diaframma [Pa]	Perdite di carico al provino [Pa]	Perdite di carico al diaframma [Pa]	Perdite di carico al provino [Pa]
20,0	29,4	20,0	31,4
42,0	61,4	42,0	63,4
72,0	103,0	72,0	106,0
112,0	156,4	112,0	159,8
160,0	218,0	160,0	223,0
216,0	289,0	216,0	293,0
280,0	368,0	280,0	376,0
351,0	452,0	351,0	467,0
430,0	546,0	430,0	576,0
516,0	651,0	516,0	658,0

Si può chiaramente evincere come né l'ordine delle schiume, né il loro verso posseggano alcuna influenza sul valore delle perdite di carico, ma d'altronde questo non stupisce, in quanto le modificazioni che subisce la morfologia del pacco di schiume è irrisoria rispetto al, ben più importante, errore di misurazione.

Si può quindi affermare con assoluta certezza che questi due parametri non influiscono sulle perdite di carico; il che, anche se può apparire banale, occorre essere provato per poter essere escluso dai parametri utili nel prosieguo della trattazione.

4.3.1.2 Confronto tra scambiatore e schiume sulla curva caratteristica del ventilatore

Da un punto di vista prettamente industriale, la funzione della schiuma metallica è di sostituire la normale batteria alettata in uno scambiatore di calore, e per realizzare ciò, occorre naturalmente che la batteria di scambio termico, riscaldata dal fluido termovettore, si scaldi a sua volta trasferendo calore all'aria da climatizzare. Come è stato precedentemente mostrato, tuttavia, le perdite di carico ricoprono un ruolo fondamentale nella progettazione di un impianto, inoltre, nella scelta fra due sistemi di scambio termico, supposto che dal punto di vista del rendimento energetico siano entrambi eguali, si preferirà il sistema che garantisce perdite di carico inferiori.

Da questo punto di vista si è passati al confronto fra la curva di perdita di carico della classica batteria metallica alettata, presente nella quasi totalità degli impianti di condizionamento a ventilconvettori, con diversi spessori di schiuma metallica impilati assieme a formare un provino *da test*, con lo scopo di verificare la supposta intercambiabilità fra i due sistemi esclusivamente dal punto di vista delle perdite di carico aerauliche.

Innanzitutto, è stata ricavata la curva del ventilatore a diverse potenze, indicate come: *MAX*, *MED* e *MIN* (tabb. 4.5, 4.6 & 4.7). I dati sono stati forniti dalla ditta costruttrice del ventilatore, la Galletti S.p.a., svolgendo le prove sperimentali con un vero ventilconvettore.

Ad ogni modo, è necessario specificare e tener conto della presenza del cosiddetto “fan system effect” quando si vogliono comparare i risultati di perdita di carico delle schiume metalliche con quelli relativi alla batteria di scambio termico dei ventilconvettori “classici”.

Nella fattispecie, durante la misurazione delle perdite di carico nel ventilconvettore, il flusso d'aria attraversa la batteria di scambio in maniera non perpendicolare, a differenza di quanto avviene nell'apparato sperimentale costruito, determinando una maggiorazione delle cadute di pressione misurate. Per poter equiparare le misurazioni effettuate tramite i due sistemi occorre quindi cambiare i parametri di scala utilizzati, ragionando non più come se i due sistemi fossero identici, ma riscalandoli a parità di portata e di velocità del fluido, quindi di sezione frontale incontrata dall'aria.

Tabella 4.5: Dati relativi alla potenza MAX.

ΔP	T_{as}	RH	Portata aria	Velocità calcolata	Potenza assorbita	Corrente assorbita	Cos F	K Tunnel
[Pa]	[°C]	[%]	[m ³ /h]	[m/s]	[W]	[A]	[-]	[-]
40	24,7	55,2	222,9	1,2	18,29	0,213	0,375	2,888
30	24,7	55,2	366,3	2,0	21,37	0,227	0,380	2,888
20	24,7	55,2	440,2	2,4	23,73	0,232	0,455	2,888
10	24,7	55,2	513,2	2,8	27,42	0,257	0,473	2,888
0	24,7	55,2	574,8	3,1	31,38	0,279	0,484	2,888

Tabella 4.6: Dati relativi alla potenza MED.

ΔP	T_{as}	RH	Portata aria	Velocità calcolata	Potenza assorbita	Corrente assorbita	Cos F	K Tunnel
[Pa]	[°C]	[%]	[m ³ /h]	[m/s]	[W]	[A]	[-]	[-]
29	25,7	52,5	141,2	0,8	10,61	0,131	0,355	2,888
20	25,7	52,5	299,6	1,6	14,83	0,150	0,413	2,888
10	25,7	52,5	405,6	2,2	17,58	0,174	0,433	2,888
0	25,7	52,5	473,6	2,5	19,68	0,199	0,457	2,888

Tabella 4.7: Dati relativi alla potenza MIN.

ΔP	T_{as}	RH	Portata aria	Velocità calcolata	Potenza assorbita	Corrente assorbita	Cos F	K Tunnel
[Pa]	[°C]	[%]	[m ³ /h]	[m/s]	[W]	[A]	[-]	[-]
15	25,7	52,5	176,5	0,9	9,12	0,113	0,351	2,888
10	25,7	52,5	273,5	1,5	10,24	0,119	0,374	2,888
0	25,7	52,5	366,9	2,0	12,62	0,135	0,403	2,888

Da questi dati sono state poi ricavate le curve del ventilatore presentate nei successivi grafici (figg 4.4, 4.5 & 4.6)

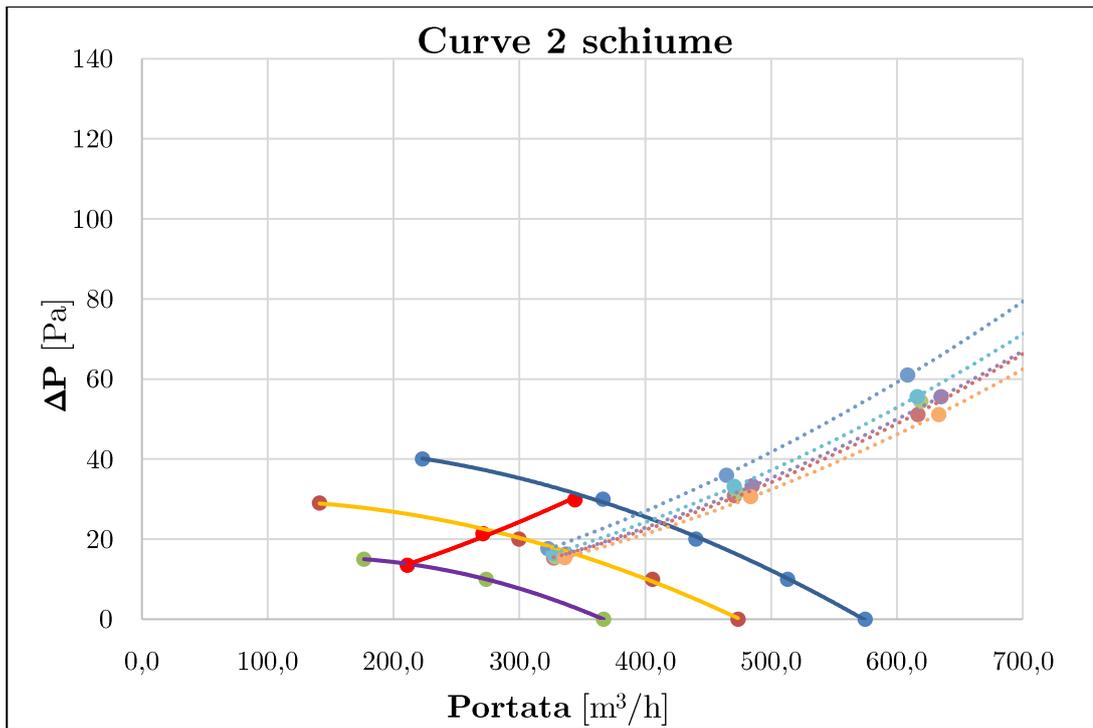


Figura 4.4: Curva ventilatore, confronto batteria-schiume 40mm.

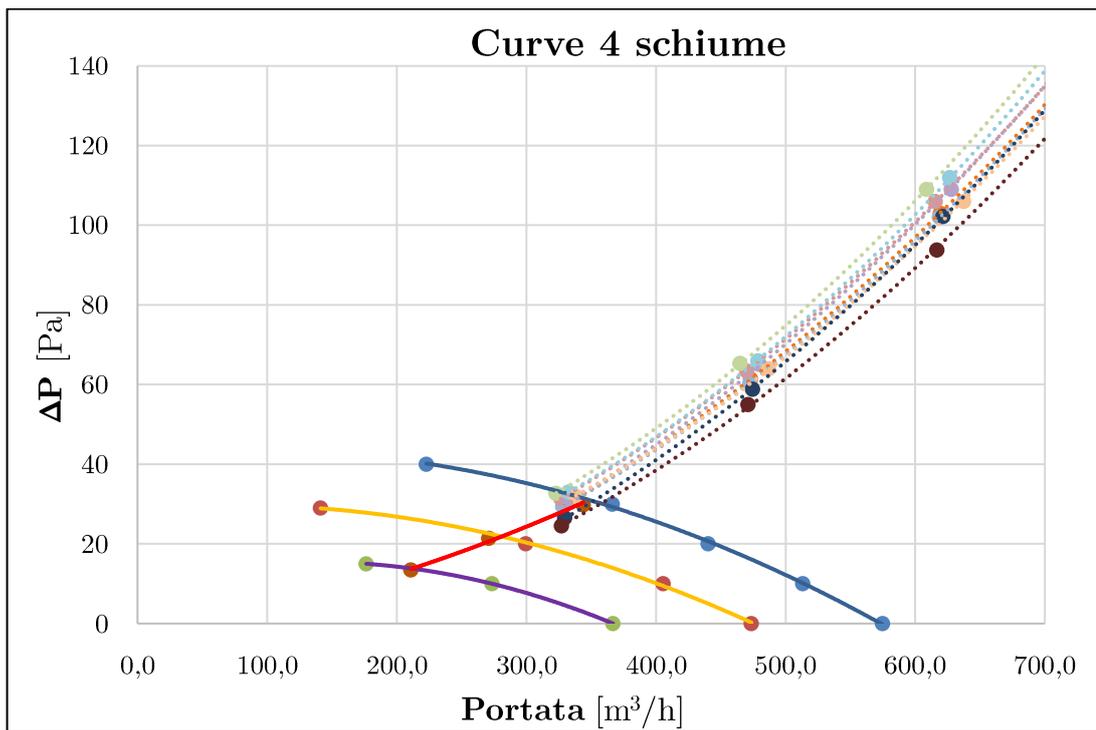


Figura 4.5: Curva del ventilatore, confronto fra batteria e schiume di spessore 80mm.

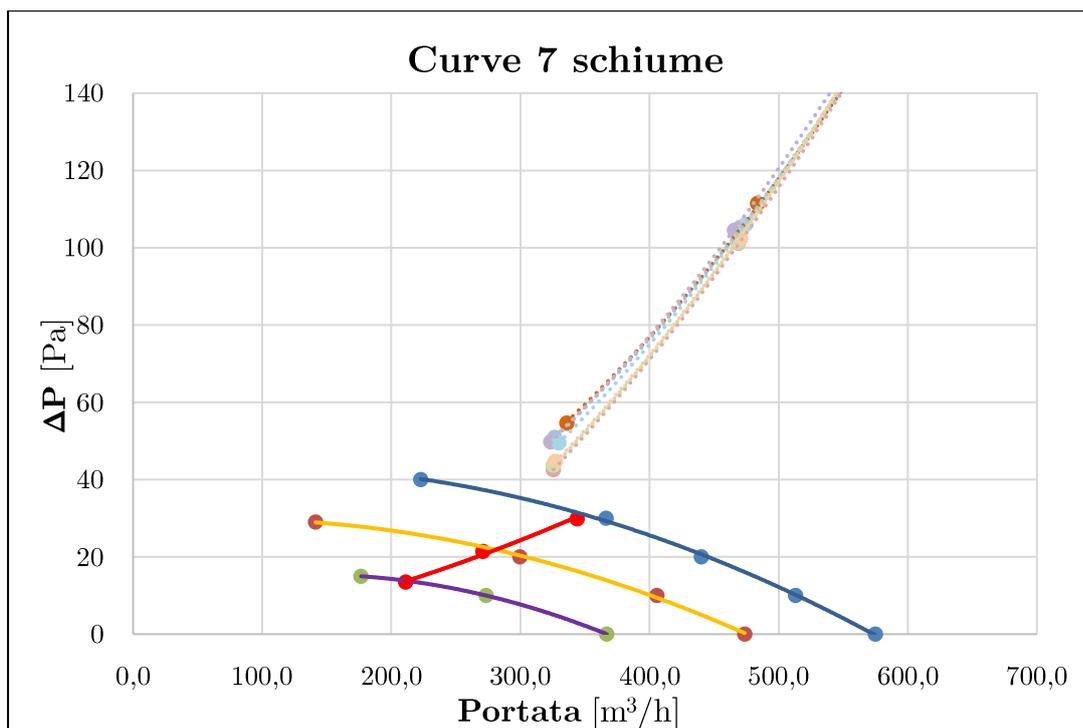


Figura 4.6: Curva del ventilatore, confronto fra batteria alettata e schiume di spessore 140mm.

I due risultati di maggiore rilevanza consistono, in primo luogo, nella conferma della similitudine fra i risultati di perdita di carico delle batterie alettate e delle schiume dello stesso spessore, cioè 80mm, con un leggero incremento delle perdite di carico nei riguardi di queste ultime.

Se si osserva in fig. 4.5 si può notare come la linea rossa corrispondente alla curva della batteria alettata somigli con ottima approssimazione alle curve tratteggiate relative ai vari campioni di schiuma metallica da 80mm testati.

La seconda conclusione alla quale si può addivenire riguarda la minor dispersione dei dati all'aumentare dello spessore, nella fattispecie si può evincere come, all'aumentare dello spessore dei provini di schiuma metallica, le curve relative a tali schiume giacciono in un cono più ristretto, aumentando quindi la *replicabilità* del risultato sperimentale, fattore di fondamentale importanza non solo da un punto di vista scientifico, ma anche e soprattutto industriale, garantendo che il comportamento di due fan-coil che montano scambiatori di spessore simile avranno effettivamente un comportamento simile.

Quest'ultima conclusione, anche se apparentemente ovvia, mostra le sue fallacie nel prosieguo della trattazione, dove verrà mostrato l'effettivo comportamento delle schiume metalliche all'aumentare del loro spessore quando attraversate da un fluido.

4.3.2 Gradiente di perdita di carico

Precedentemente citato come *perdita di carico per unità di lunghezza* o anche semplicemente attraverso la sua formula matematica, dp/dz ; esso esprime il

gradiente di pressione in relazione allo spessore della schiuma ed è un parametro critico per la trattazione, importante per caratterizzare la schiuma metallica da un punto di vista fisico.

Lo studio del parametro *gradiente di perdita di carico* serve appunto a far luce sul comportamento del fluido all'interno del mezzo poroso, cercando di addivenire ad una conclusione che ne riveli la concordanza o meno col modello teorico scelto per descrivere tale problema fisico, ovvero la *legge di Darcy-Forchheimer*. Da un punto di vista pratico, invece, è necessario indagare sull'entità delle perdite di carico di tali apparati per poter più efficacemente confrontare gli odierni sistemi ventilconvettivi di climatizzazione dell'aria con quelli più innovativi, proposti nel caso studio, che ne sostituiscano il componente principale con un succedaneo fabbricato in schiuma metallica.

Dalle perdite di carico nelle schiume metalliche, così come dal relativo loro *gradiente*, si possono estrarre informazioni utili da un punto di vista prettamente industriale, relative alla rumorosità del flusso nei canali o della potenza elettrica necessaria al ventilatore per sospingere il fluido, fondamentale da un punto di vista impiantistico per il corretto dimensionamento di un impianto.

Nell'indagine sperimentale presentata si è voluto indagare sull'ipotetica dipendenza del gradiente lineare di perdita di carico in relazione a due distinti parametri: lo **spessore della schiuma** e la **velocità del flusso d'aria**.

4.3.2.1 Dipendenza dallo spessore

Per investigare sulla dipendenza dallo spessore si è proceduto ad effettuare prove sperimentali di perdite di carico a spessori del provino sempre maggiori, impilando sussecutivamente un numero sempre crescente di schiume. Dai risultati presentati in precedenza si evince chiaramente, e senza alcuna sorpresa, che all'aumentare dello spessore del provino aumentano in maniera proporzionale le perdite di carico associate. Il gradiente di perdita di carico dovrebbe ipoteticamente seguire un andamento costante, presentando una perdita di carico per unità di lunghezza fissa al variare dello spessore. Si presentano seguentemente i risultati di tutte le prove effettuate, suddivise per diverse categorie di spessori (tab. 4.8), estrapolandone poi un grafico riassuntivo comprensivo di linea di tendenza espressione dell'andamento medio (figg. 4.7, 4.8 e 4.9).

Tabella 4.8: Raccolta dei dati di gradiente di perdita di carico, suddivisi per spessore e per velocità dell'aria.

Vel. aria	Media						
	$\left(\frac{dp}{dz}\right)$ 1 Schiume	$\left(\frac{dp}{dz}\right)$ 2 Schiume	$\left(\frac{dp}{dz}\right)$ 3 Schiume	$\left(\frac{dp}{dz}\right)$ 4 Schiume	$\left(\frac{dp}{dz}\right)$ 5 Schiume	$\left(\frac{dp}{dz}\right)$ 6 Schiume	$\left(\frac{dp}{dz}\right)$ 7 Schiume
[m/s]	[Pa/m]						
1,7	384,04	385,95	359,12	348,69	328,01	351,45	330,47
2,4	784,67	782,22	736,05	741,05	716,30	731,28	712,16
3,1	1312,71	1314,18	1257,30	1261,95	1229,13	1231,86	1213,01
3,9	2011,69	2010,43	1944,20	1940,42	1890,66	1884,50	1861,13
4,7	2846,81	2857,67	2746,65	2745,39	2676,53	2648,52	2621,02
5,4	3819,38	3832,02	3652,16	3655,52	3590,00	3521,89	3510,46
6,2	4955,12	4935,50	4716,59	4697,83	4612,43	4511,68	4482,08
6,9	6163,45	6150,85	5849,99	5836,03	5720,55	5600,68	5549,37
7,6	7543,14	7517,59	7147,81	7098,08	6969,24	6808,28	6736,49
8,4	9052,78	8960,06	8538,47	8457,39	8282,21	8110,06	8012,80

Le tre righe evidenziate con una tonalità più scura sono rispettivamente corrispondenti alle velocità di 3,1 m/s, 5,4 m/s e 8,3 m/s, rappresentanti i limiti fra velocità *basse*, *medie* e *alte* limitatamente alla trattazione del caso studio, relativamente alle schiume in lega di alluminio a 10 PPI.

I grafici sottostanti riportano i risultati di tutte le prove effettuate ad ogni spessore fra 20 e 140 mm, suddivise per i tre valori di velocità appena citati. Sull'asse delle ascisse compare il numero di schiume impilate assieme, ove ogni schiuma rappresenta **uno spessore aggiuntivo di 20mm** di schiuma metallica al provino; sull'asse delle ordinate, invece, compare il *gradiente di pressione* in relazione allo spessore lineare, appunto.

È importante specificare che i valori riportati sono al netto di una scrematura dei risultati volta a raffinare i risultati sperimentali, eliminando valori chiaramente fuori misura o viziati da un'incertezza troppo consistente, probabilmente dovuti ad *errori accidentali* o malfunzionamenti dell'apparato sperimentale e/o degli strumenti di misura. Dopo aver effettuato questa raffinazione i risultati si presentano in questa forma (figg. 4.4, 4.5 e 4.6).

È importante specificare inoltre che i grafici presentati successivamente sono comprensivi di *barre di errore* posizionate sui punti corrispondenti ai valori medi delle prove effettuate, per dato numero di schiume. L'entità dell'incertezza è stata determinata tramite il calcolo presentato nel capitolo precedente, quindi con una barra d'incertezza del $\pm 2\%$.

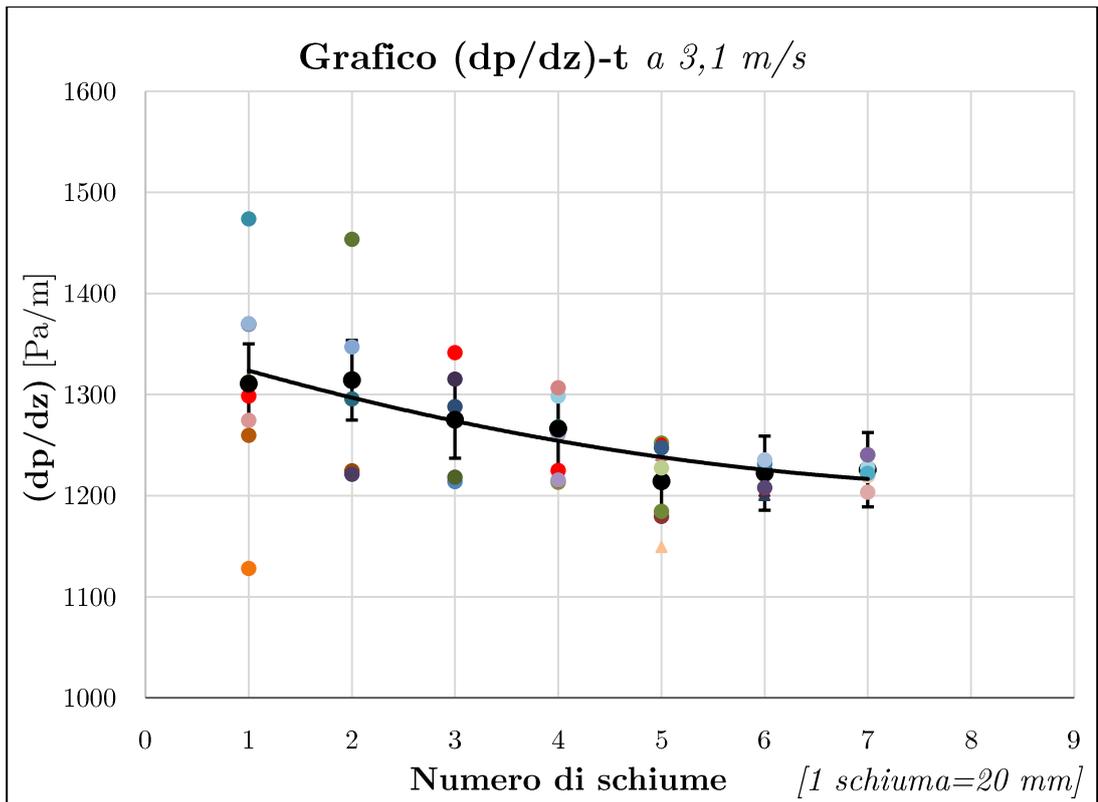


Figura 4.7: Grafico del gradiente di pressione a 3,1 m/s.

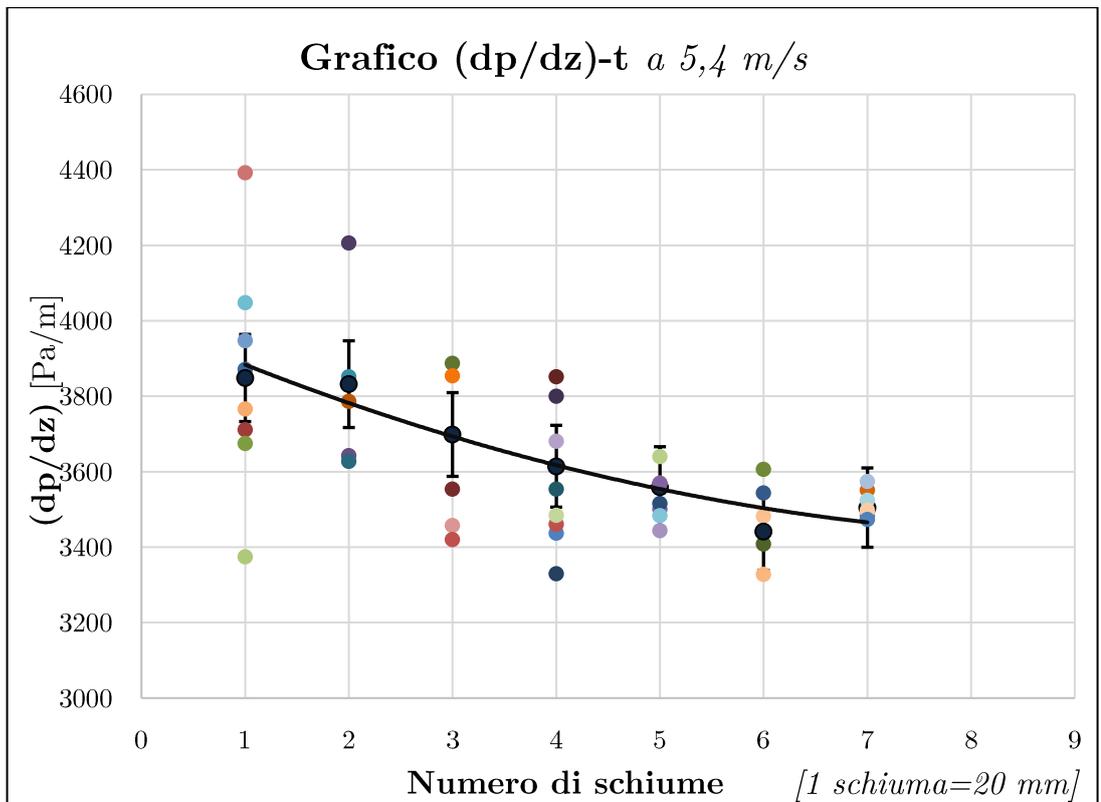


Figura 4.8: Grafico del gradiente di pressione a 5,4 m/s.

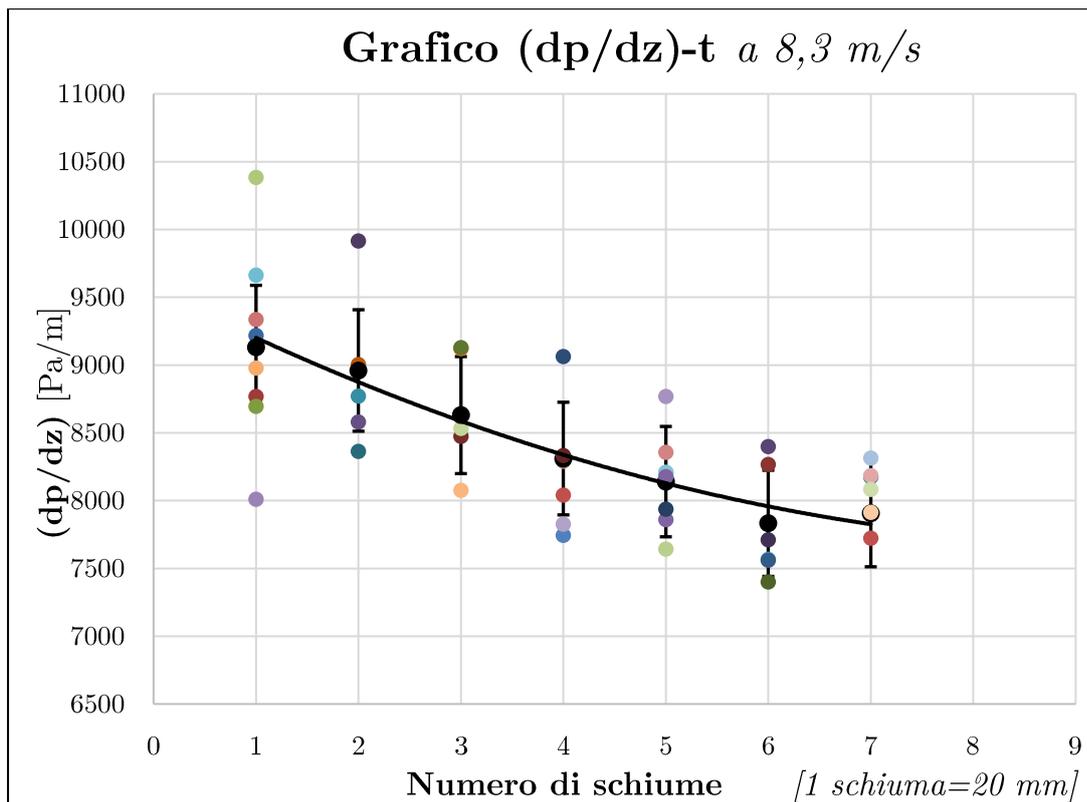


Figura 4.9: Grafico del gradiente di pressione a 8,3 m/s.

Da una prima analisi qualitativa si può notare come l'andamento del dp/dz sia tendenzialmente decrescente con l'aumentare dello spessore, contrariamente con quanto ipotizzato in precedenza.

L'andamento della decrescenza cala con legge quadratica rispetto al numero di schiume, giungendo apparentemente ad assestarsi a valori di spessore compresi fra gli 80 mm e i 100 mm.

Tale comportamento potrebbe essere dovuto alla riduzione delle resistenze liminari di carico fra i campioni di schiuma, infatti all'entrata e all'uscita della schiuma, il fluido subisce ulteriori effetti turbolenti, incrementando la dissipazione di energia di pressione, traducesi in perdita di carico aggiuntiva. Se tuttavia, i campioni di schiuma sono impilati assieme senza essere intervallati da vuoti d'aria allora l'effetto delle resistenze liminari diventa proporzionalmente meno rilevante nel computo della perdita di carico totale, derivandone un decremento del gradiente lineare di pressione, come precedentemente mostrato.

Tale risultato riguardante il dp/dz è già stato presentato in un altro studio condotto da Barilet *al.*⁴ e da de Carvalho *et al.*⁵, i quali suggeriscono nei loro lavori

⁴ Baril, E., Mostafid, A., Lefebvre, L.P., Medraj, M., "Experimental demonstration of the entrance/exit effects on the permeability measurements of porous materials" - Advanced Engineering Materials, Vol. 10, (2008)

l'esistenza di un valore critico di spessore, chiamato **spessore critico**, al di sopra del quale il comportamento della schiuma muta, assestandosi ad un valore circa costante di dp/dz , tale ipotesi verrà approfondita maggiormente in seguito, in quanto trova conferma nei risultati sperimentali ricavati durante l'esperienza sperimentale effettuata.

Per quanto riguarda invece gli effetti di entrata ed uscita dalla schiuma è stato investigato in tal senso negli studi dei sopracitati *Barilet al.* e di *Dukhan et al.*⁶.

Un altro importante risultato può essere estrapolato analizzando i grafici presentati. Appare immediatamente chiaro come, all'aumentare dello spessore del provino di schiuma metallica, la dispersione dei risultati sia considerevolmente inferiore, infatti mentre in corrispondenza di uno spessore di 20 mm i risultati siano dispersi in una barra d'incertezza pari a circa il $\pm 10\%$, mentre aumentando a 140 mm lo spessore del provino si giunga ad una dispersione inferiore alla barra d'incertezza, pari al $\pm 2\%$. Questo comportamento può essere facilmente riprodotto analizzando altri tipi di relazioni, le quali verranno approfondite successivamente.

L'ipotesi mossa, concernente l'esistenza di tale *spessore critico* della schiuma trova parziale conferma nei dati presentati; infatti si può notare come, in corrispondenza dei circa 80mm di spessore, i punti della media riducano consistentemente il loro andamento decrescente, ciò è ancora più evidente considerando l'effetto delle barre d'errore; i punti della linea di tendenza possono infatti oscillare liberamente entro le barre d'errore, rendendo del tutto plausibile un andamento totalmente piano ed orizzontale della linea di tendenza.

Tale ipotetico *spessore critico* rappresenterebbe un valore dello spessore della schiuma metallica al di là del quale la dispersione dei risultati sta al di sotto di un valore di soglia, postulabile intorno al $\pm 2\%$ per questa applicazione, facendo rassomigliare fra di loro le curve di gradiente di pressione estrapolate, sia all'aumentare della velocità del fluido che dello spessore della schiuma.

La coerenza con la quale questo effetto sia visibile anche a velocità diverse funge ad ulteriore conferma del risultato presentato, potendo dunque affermare con buona dose di sicurezza che il gradiente lineare di pressione cala all'aumentare dello spessore del provino, in accordo con l'ipotesi della diminuzione proporzionale dell'effetto delle resistenze aerauliche liminari.

⁵ De Carvalho T.P., Morvan H.P., Hargreaves D.M., Oun H, Kennedy A., “*Pore-scale numerical investigation of pressure drop behaviour across open-cell metal foams*”, *Transport in Porous Media*, Vol. 117, Issue: 2, pp. 311–336, (2017)

⁶Dukhan N., Patel K.P., “*Entrance and Exit Effects for Fluid Flow in Metal Foam*”, *American Institute of Physics Conference Proceedings*, 1254, pp. 299-304, (2010)

Ciononostante, gli andamenti mostrati in figg. 4.4, 4.5 & 4.6 sembrano presentare alcune differenze, ad esempio si può notare come il valore di spessore della schiuma in corrispondenza del quale l'andamento del dp/dz diventa pressoché costante diventa progressivamente maggiore all'aumentare della velocità dell'aria. In altre parole, a 3,1 m/s (fig. 4.4) lo spessore critico è circa 60-80 mm, infatti la curva media inizia ad assumere un andamento orizzontale costante; a 8,3 m/s invece, per riprodurre tale comportamento, si dovrebbe aumentare lo spessore fino a 120-140 mm. Quindi a velocità basse lo *spessore critico* sembra essere minore che a velocità alte; ciò verrà ulteriormente approfondito nella sezione successiva.

4.3.2.2 Dipendenza dalla velocità

La seconda ipotesi avanzata nella presentazione dei risultati di gradiente di pressione riguarda la sua dipendenza dalla velocità. Dall'equazione (eq. 2.9) si evince chiaramente come la dipendenza del dp/dz dalla velocità Darciana sia invariabilmente quadratica, più un contributo lineare che prevale a basse velocità.

Nei successivi grafici è stato tracciato l'andamento del *gradiente di pressione* rispetto alla *velocità Darciana* u , suddividendo la rappresentazione per tre distinti spessori: 20 mm (1 schiuma), 80 mm (4 schiume) e 140 mm (7 schiume). L'obiettivo è di poter meglio distinguere le differenze fra spessori diversi, sperabilmente includendo anche lo spessore in corrispondenza del quale avviene la "transizione", ovvero lo *spessore critico*.

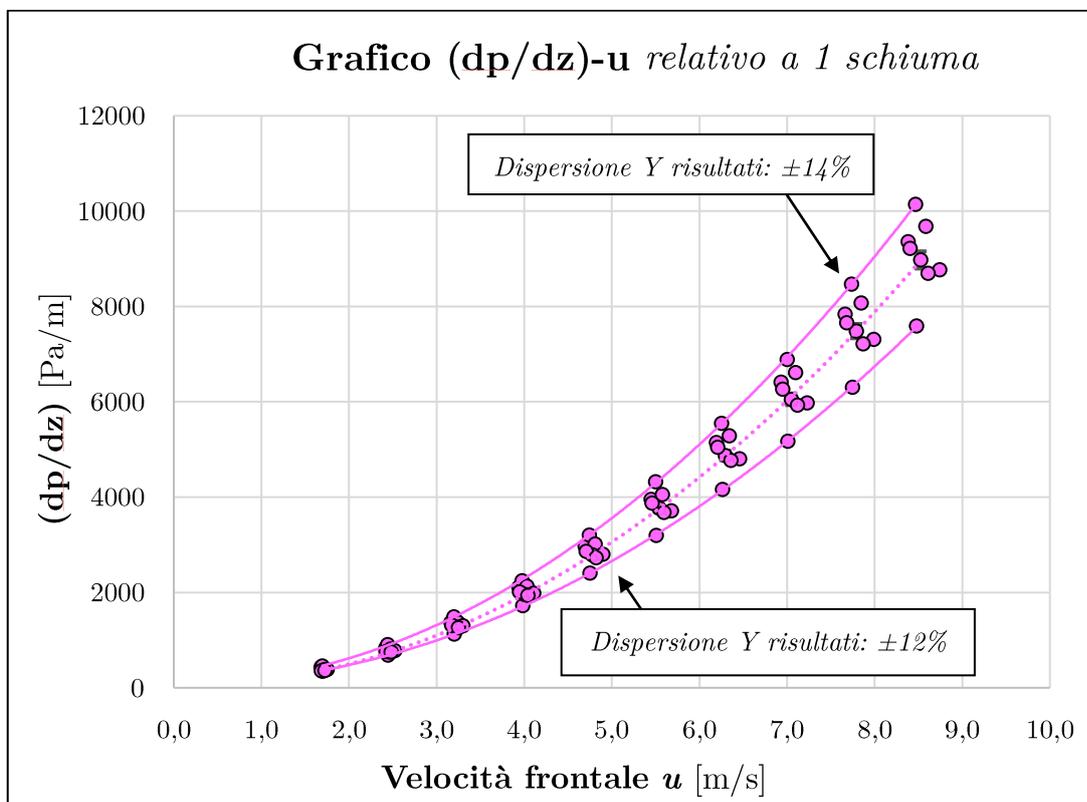


Figura 4.10: Grafico del gradiente di pressione rispetto alla velocità, spessore della schiuma: 20mm

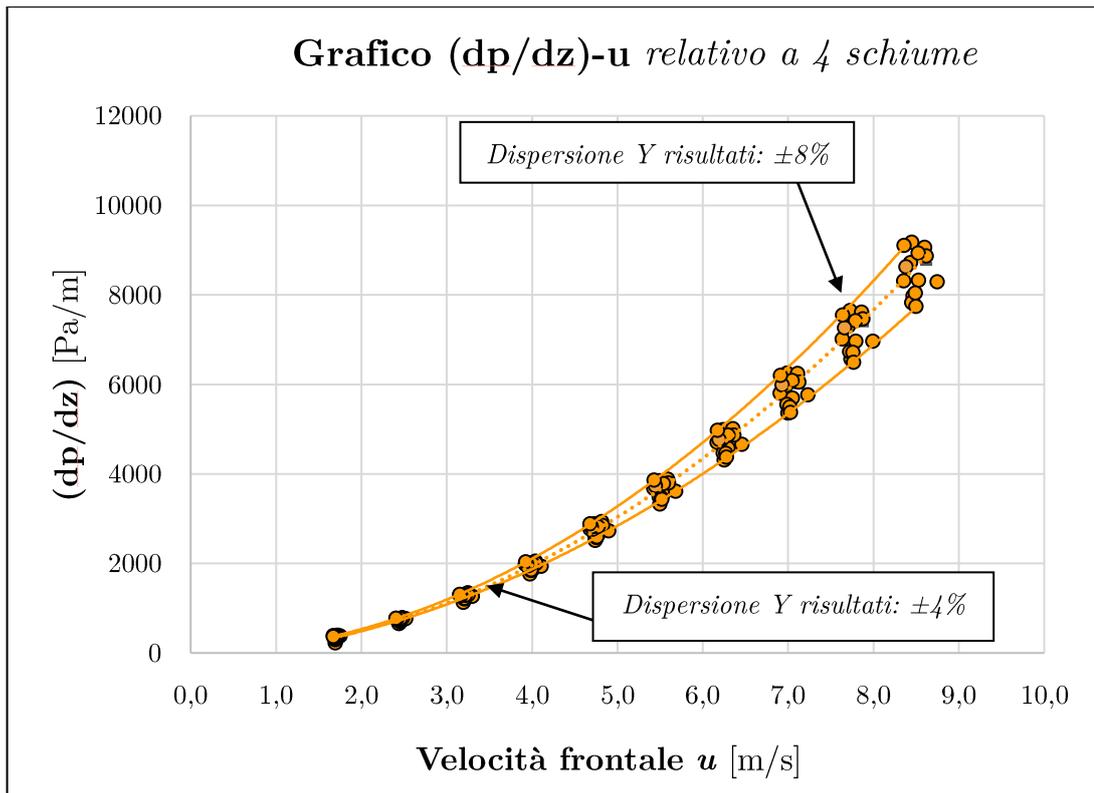


Figura 4. 11: Grafico del gradiente di pressione rispetto alla velocità, spessore della schiuma: 80mm.

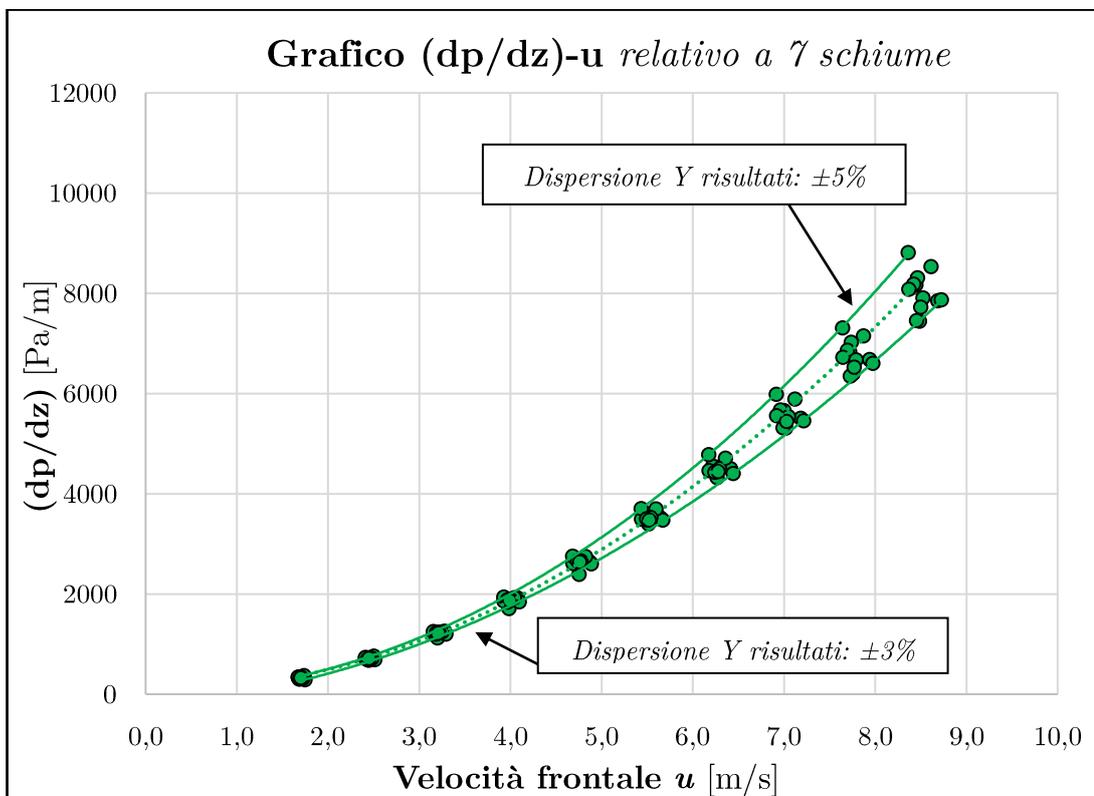


Figura 4.12: Grafico del gradiente di pressione rispetto alla velocità, spessore della schiuma: 140mm.

Da queste figure (figg. 4.10, 4.11 & 4.12) si può trovare ulteriore conferma del fatto che la dispersione dei risultati di perdita di carico si riduca all'aumentare dello spessore. In particolare, è rilevante il fatto che la dispersione dei risultati sull'asse delle ordinate aumenti all'aumentare della velocità, invece di rimanere costante lungo tutto l'asse delle ascisse. Inoltre, si può constatare come tale tendenza di diminuzione della dispersione sia coerente attraverso i tre grafici, e anzi, come tale dispersione diminuisca proporzionalmente in maniera maggiore più è grande lo spessore che l'aria deve attraversare. In altre parole, pare giusto sottolineare come lo *spessore critico*, anche in questo caso, sia una funzione direttamente proporzionale della velocità del fluido, qualitativamente parlando.

Le prove effettuate allo spessore più alto (fig. 4.12) mostrano una dispersione percentuale dei risultati pari, o addirittura minore, al $\pm 5\%$ di oscillazione tipico delle prove sperimentali. Questo tipo di risultato, se analizzato da un punto di vista più esteso, rappresenta un forte indizio di essere giunti oltre alla soglia definita dallo *spessore critico* in quanto la dispersione data dalla non-omogeneità delle schiume e dai semplici *errori accidentali* o *aleatori* risulta indistinguibile, potendo perciò affermare che la schiuma, raggiunto tale spessore, si comporta esattamente come farebbe qualsiasi altra schiuma con le stesse caratteristiche morfologiche, entro un campo d'incertezza sufficientemente piccolo.

Ripensando a quanto appena affermato, si può constatare come già ad 80mm di spessore la dispersione dei risultati vada a rassomigliare molto al campo d'errore "ineliminabile" del $\pm 5\%$. Non a caso, l'ipotesi iniziale, mossa dopo aver analizzato i grafici mostrati in precedenza (figg. 4.4, 4.5 & 4.6) era proprio che lo *spessore critico* per tale applicazione si trovasse fra gli **80mm** e i **100mm** di spessore, con riferimento alle schiume testate durante la prova, ovvero in AlSi7Mg e 10PPI, 96,5% di porosità.

Nella figura successiva è presentato un utile raffronto fra le tre tendenze. Con tale rappresentazione si vuole confrontare più efficacemente le tendenze mostrate in precedenza (figg. 4.7, 4.8 & 4.9), relative agli spessori di 20, 80 e 140 mm. Da tale raffronto appare chiaro quanto precedentemente affermato rispetto alla dispersione dei risultati, si nota inoltre una tendenza al collasso delle curve di dp/dz su una curva unica. È possibile infatti notare uno scostamento minimo fra le tendenze una volta raggiunti circa gli 80mm di spessore.

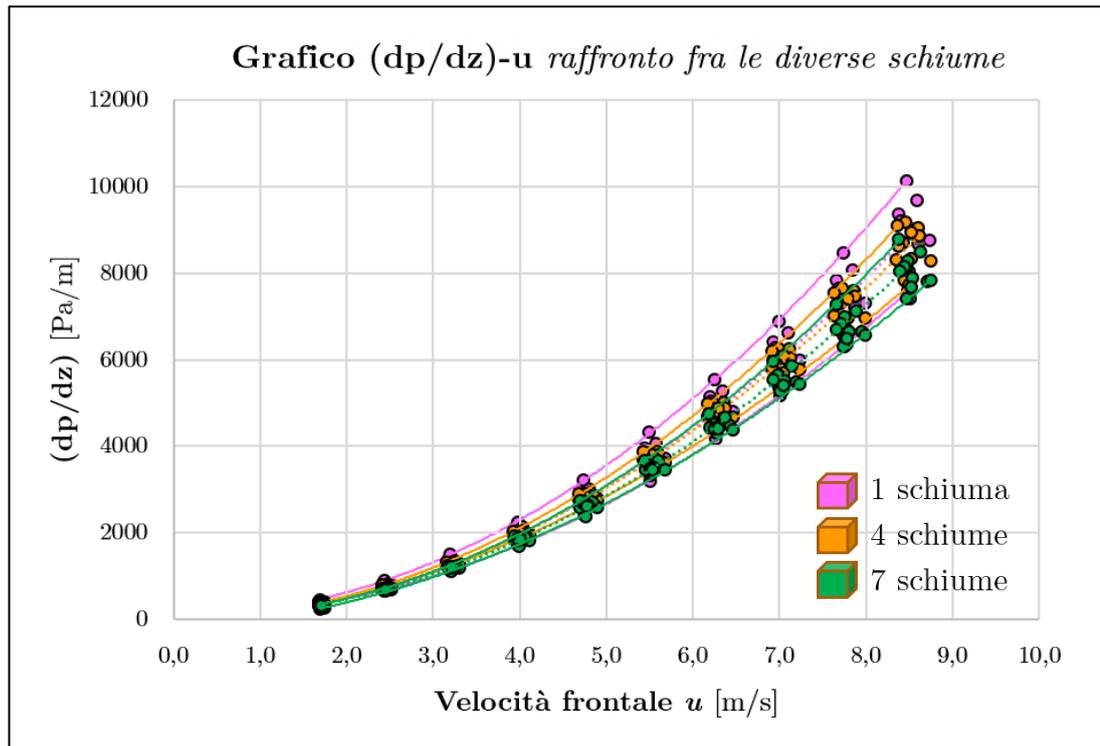


Figura 4.13: Grafico del gradiente di pressione rispetto alla velocità, raffronto fra i vari spessori.

Se si osserva l'andamento medio del dp/dz in funzione della u , mostrato nella figura sottostante (fig. 4.14) è difficile distinguere i vari andamenti suddivisi per spessore del provino, tuttavia, è possibile notare il previsto andamento quadratico della curva.

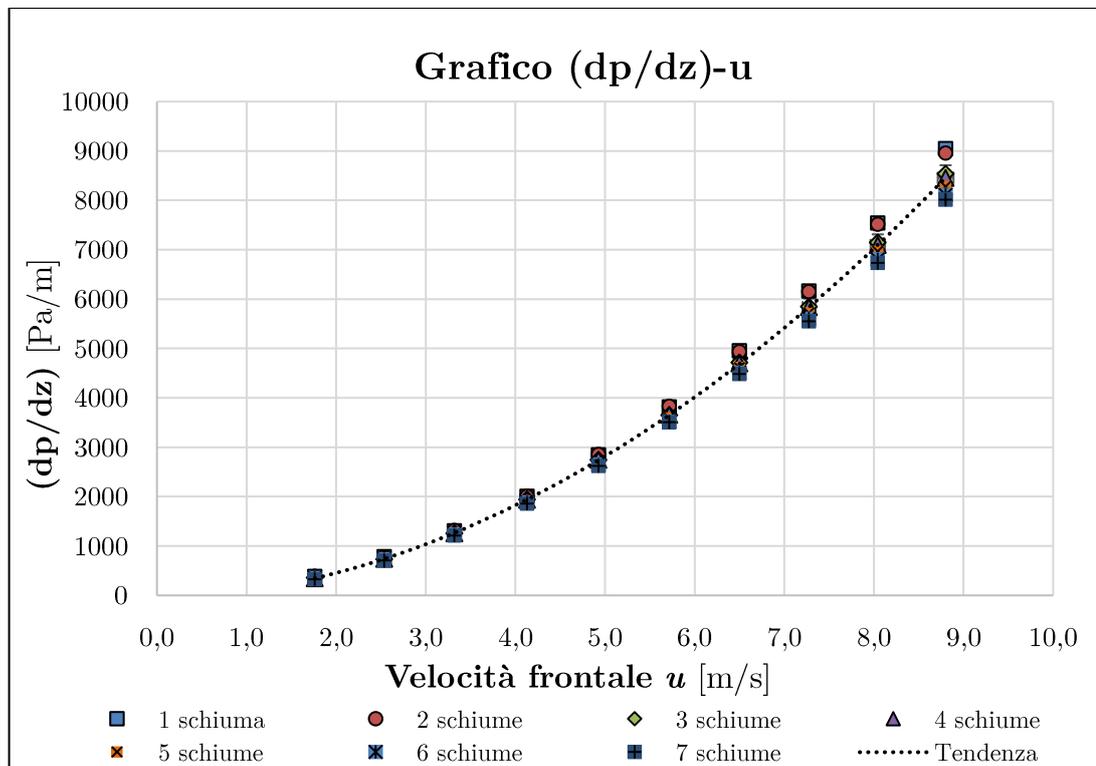


Figura 4.14: Grafico dell'andamento del (dp/dz) in funzione della velocità, a vari spessori.

Per discernere meglio i punti fra di loro è necessario effettuare un ingrandimento, potendo quindi distinguere meglio anche le barre d'errore di cui i punti sono provvisti.

Tale campo d'incertezza è stato ricalcolato utilizzando il metodo citato in precedenza nel capitolo III relativo alla propagazione degli errori nel calcolo delle medie; è risultato pari a circa il $\pm 3\%$ d'incertezza per il gradiente lineare di pressione, e di circa il $\pm 1\%$ per la velocità frontale del fluido, come già precedentemente calcolato.

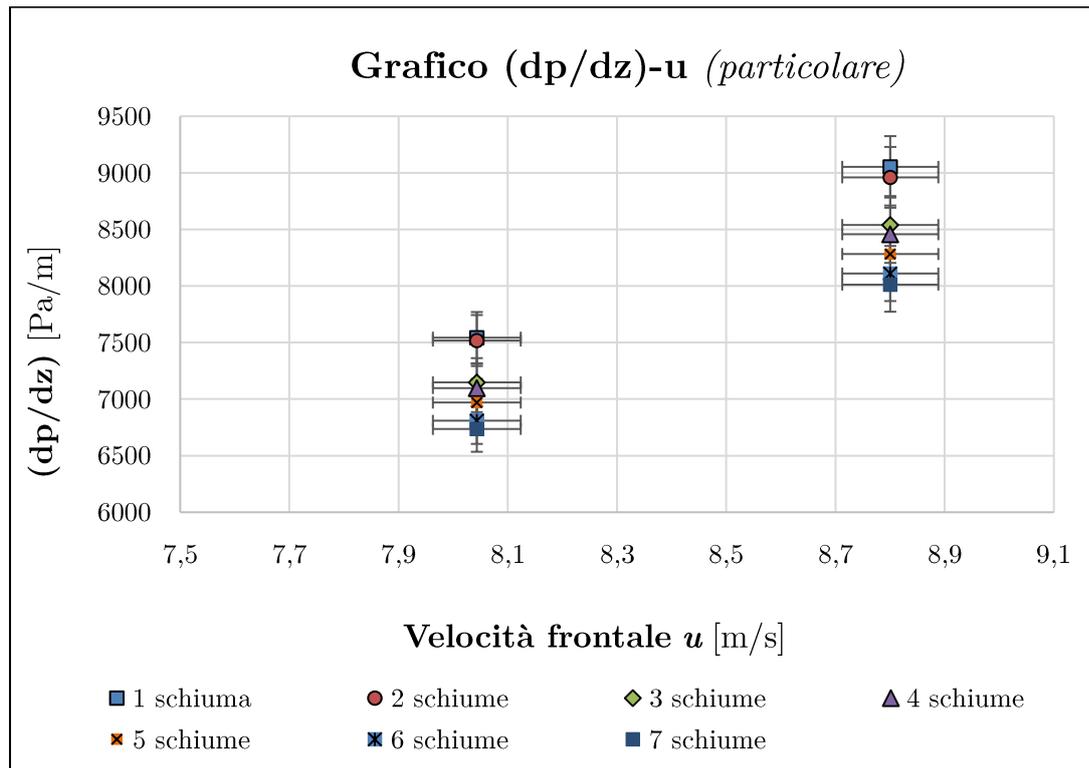


Figura 4.15: Ingrandimento del grafico in fig. 4.14

In questa figura si può notare più chiaramente come le barre d'errore non collimino fra di loro, distinguendo in maniera più palese due tendenze separate fra il comportamento degli spessori dai 20 ai 40 mm e degli spessori superiori a 60 mm. Se gli andamenti del dp/dz collassassero in un'unica curva, cosa che succede solo al di sopra degli 80 mm di spessore, significherebbe che lo spessore della schiuma non ha alcuna influenza sul gradiente di pressione al variare della velocità, cosa che è già stata dimostrata invariabilmente falsa, potendo infatti distinguere gli andamenti del dp/dz al variare dello spessore.

4.3.3 Linearizzazione di Darcy-Forchheimer

Giunti a questo punto della trattazione è stato ampiamente verificato che sia la *perdita di carico totale* affrontata dall'aria nell'attraversamento della schiuma, sia il *gradiente lineare di perdita di carico* si comportano perfettamente in accordo con la *legge di Darcy-Forchheimer* (eq. 2.9), delineando una curva tendenzialmente lineare a basse velocità e quadratica invece a velocità superiori. In accordo con quanto affermato dalla legge di Darcy-Forchheimer, tuttavia, questo comportamento da curva polinomiale di secondo grado dovrebbe tramutarsi in una retta, caratterizzata unicamente da un coefficiente angolare, chiamato b , e un termine noto, detto a .

Questa linearizzazione è già stata anticipata in questo capitolo (eq. 4.1) e viene qui riproposta per chiarezza:

$$-\frac{dp}{dz} \cdot \frac{1}{u} = \frac{\mu}{k} + \frac{f \cdot \rho}{\sqrt{k}} \cdot u = a + b \cdot u \quad (4.1)$$

Come già descritto in precedenza (eqq. 4.2, 4.3 & 4.4), è possibile estrapolare tre parametri morfologici caratterizzanti da tale equazione: la permeabilità k , il coefficiente inerziale f e il parametro caratteristico C .

Per ogni singola prova effettuata è stata effettuata la linearizzazione descritta dall'eq. 4.1, ricavandone un k , un f e un C , come seguentemente descritto.

A titolo esemplificativo viene presentata la linearizzazione relativa ad una prova sperimentale:

Tabella 4.9: Raccolta dati.

25/09/2018			
Schiume -->5+3+2+1-->, 80mm, Al-10 PPI			
ΔP diaframma [Pa]	ΔP provino [Pa]	Velocità frontale u [m/s]	$\left(\frac{dp}{dz}\right)\left(\frac{1}{u}\right)$ [Pa·s·m ⁻²]
20,0	29,4	1,70	205,5
42,0	61,4	2,45	298,0
72,0	103,0	3,21	381,8
112,0	156,4	3,99	466,0
160,0	218,0	4,76	544,6
216,0	289,0	5,52	622,4
280,0	368,0	6,28	697,2
351,0	452,0	7,03	764,9
430,0	546,0	7,77	835,9
516,0	651,0	8,50	910,9

Temp. Aria [°C]	24,4
Densità aria [kg/m ³]	1,1869
Porosità media	0,965

Spessore schiuma [m]	0,0841
Area frontale schiuma [m ²]	0,00864

Viscosità dinamica μ [Pa·s]	1,8416E-05
Viscosità cinematica ν [m ² /s]	1,5517E-05
a [kg·m ⁻³ ·s ⁻¹]	48,75
b [kg·m ⁻⁴]	102,3

Dalla linearizzazione del dp/dz dividendolo per la velocità Darciana u si calcola infine il $(dp/dz)(1/u)$ dal quale si possono ricavare le variabili interessate.

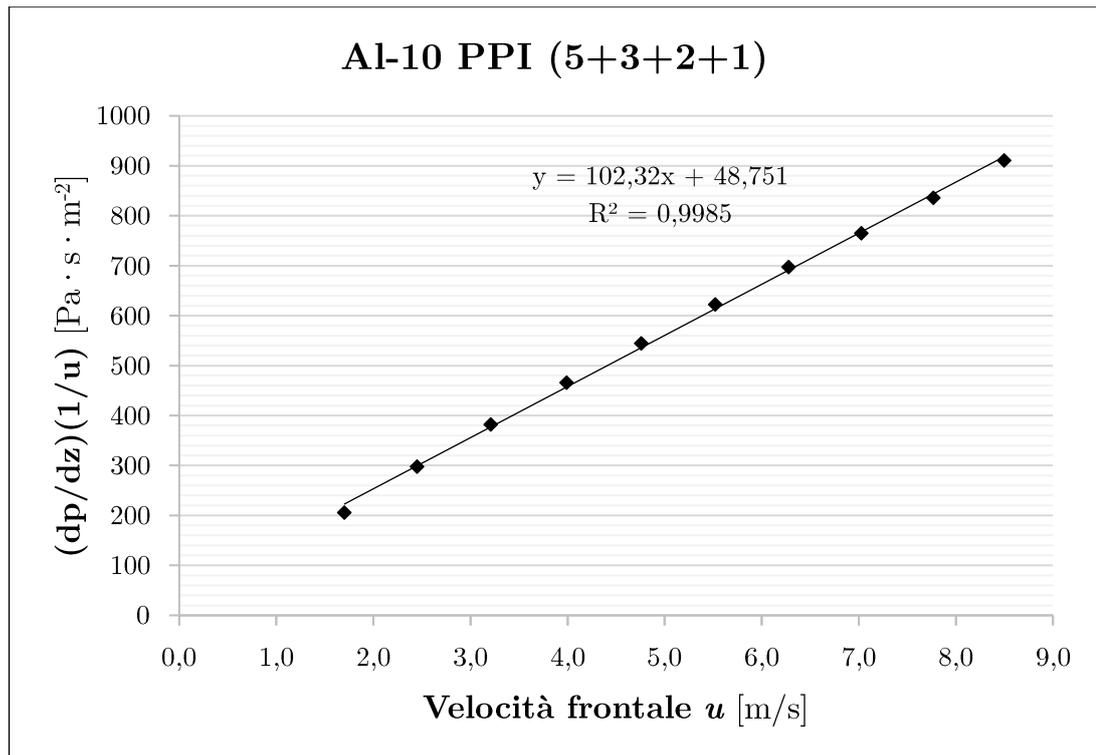


Figura 4.16: Esempio di linearizzazione del (dp/dz) rispetto alla velocità, grafico $(dp/dz)(1/u)-u$.

Un'analisi preliminare dei dati riportati in questo grafico (fig. 4.16) mostra che la linearità fra il $(dp/dz)(1/u)$ e la velocità u è pressoché perfetta, con un indice di collimazione della linea di tendenza R^2 di 0,9985, molto vicino all'unità, ovvero alla collimazione perfetta. Questo funge da ulteriore riprova alla validità del modello dettato dalla legge di Darcy-Forchheimer e dalla correttezza della sua applicazione al caso studio in esame.

Per la prova in questione, ricordando le eq. 4.2, 4.3 & 4.4, si ottiene:

$$k = \frac{\mu}{a} = \frac{1,8416 \cdot 10^{-5}}{48,75} \sim 3,78 \cdot 10^{-7};$$

$$f = \frac{b \cdot \sqrt{k}}{\rho} = \frac{102,32 \cdot \sqrt{3,78 \cdot 10^{-7}}}{1,1869} \sim 0,0529;$$

$$C = \frac{b}{\rho} = \frac{102,32}{1,1869} \sim 86,19;$$

Come riassunto in tab. 4.10:

Tabella 4.10

k [m ²]	f [ad.]	C [m ⁻¹]
3,78E-07	0,0529	86,19

4.3.3.1 Calcolo della dispersione dei risultati

La letteratura scientifica riguardante le schiume metalliche mostra spesso, con riferimento agli altri risultati presentati in questa trattazione, in particolare riguardo all'esistenza di uno spessore critico della schiuma, alla sua dipendenza proporzionale con la velocità del fluido e alla diminuzione del gradiente di pressione rispetto allo spessore di schiuma. Tuttavia, sussiste una importante differenza nei confronti della letteratura scientifica disponibile quando, confrontati i risultati, nella letteratura spesso si giunge alla conclusione dell'esistenza di un valore "unico" di permeabilità k della schiuma e del parametro f .

In altre parole, nella letteratura esaminata, molti autori presentano i loro risultati sperimentali, estrapolando, per ogni singola prova effettuata, un valore di permeabilità. La dispersione di tali valori di permeabilità è spesso piuttosto ridotta, raggiungendo approssimativamente un massimo del $\pm 10\%$ secondo *Baril et al.*, molto superiori secondo altri, fino al $\pm 100\%$ secondo *Oun et al.*

In particolare, quest'ultimo studio sottolinea come i risultati relativi alla permeabilità della schiuma soffrano di una dispersione eccessiva per poter essere considerati indubbiamente validi, anche confrontando i risultati di altri autori, l'incoerenza fra i risultati era evidente.

Uno studio simile⁷, condotto da *Kumar et al.*, si era proposto di raccogliere lo stato dell'arte relativo alla ricerca riguardante le schiume metalliche, ed anche questo studio ha effettivamente riscontrato una dispersione dei valori di k anche fino al $\pm 200\%$.

Seguentemente, si propone la totalità dei dati raccolti a seguito della linearizzazione del gradiente di pressione rispetto alla velocità del fluido (figg. 4.17), per poi presentarne una suddivisione in altri tre grafici (figg. 4.18, 4.19 & 4.20). Questa separazione in tre categorie è stata effettuata sulla base del numero di schiume allineate a formare un provino *da test*.

⁷ Kumar P., Topin F., "State-of-the-Art of Pressure Drop in Open-Cell Porous Foams: Review of Experiments and Correlations", Journal of Fluids Engineering, Vol. 139. 111401-13, (2017)

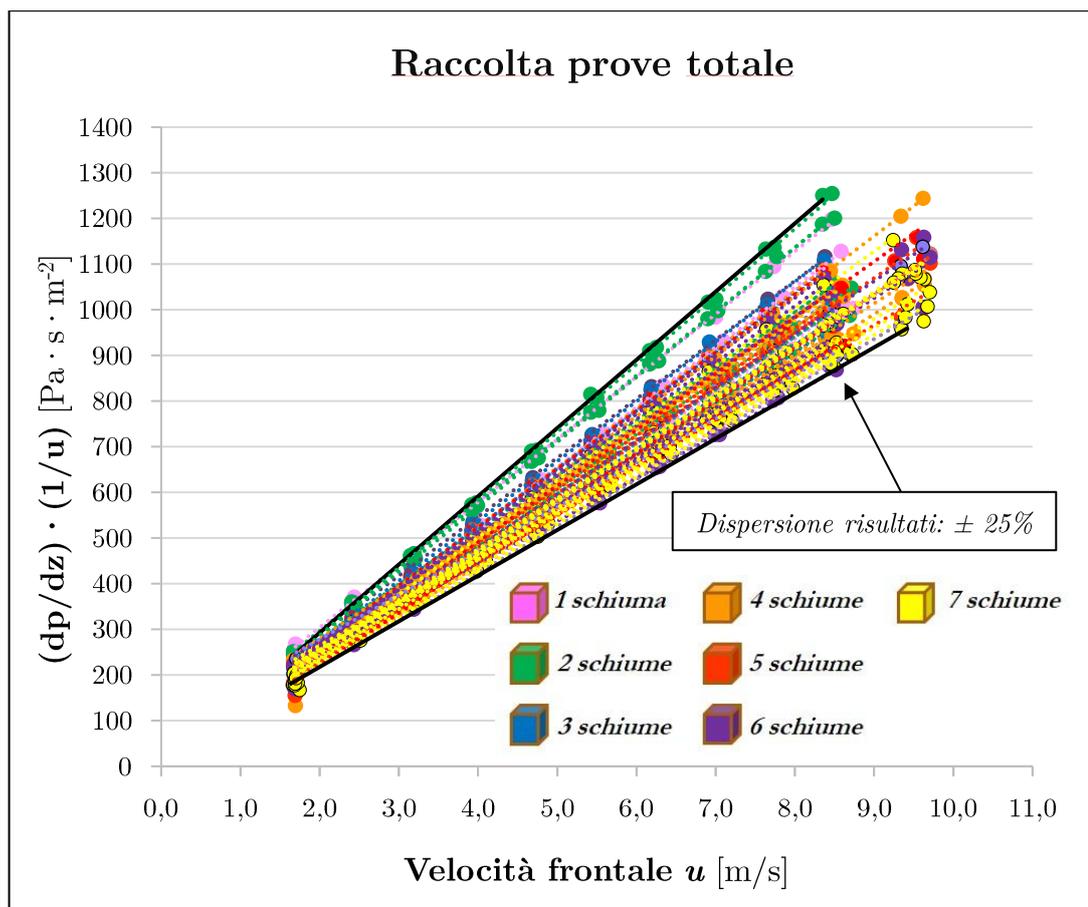


Figura 4.17: Raccolta delle prove effettuate, linearizzazione del (dp/dz) rispetto alla velocità.

In questa figura non è possibile trarre conclusioni definitive, tuttavia si può comunque desumere l'esistenza di una perfetta correlazione lineare fra le due grandezze, con un R^2 medio calcolato di 0,9992, quindi estremamente vicino all'unità. La seconda conclusione che si può stabilire è che, qualitativamente, si nota come ad uno spessore maggiore del provino di schiuma corrisponde una pendenza inferiore della retta. Si evince, appunto, come le schiume spesse appena dai 20mm ai 40mm (colorate rispettivamente in rosa e in verde) occupino la parte superiore del cono racchiudente la totalità delle prove sperimentali. Viceversa, come è possibile constatare, le prove contrassegnate in viola e giallo, corrispondenti a spessori di 120mm e 140mm occupano la parte inferiore del suddetto cono.

La pendenza della retta, in questo caso, dipende maggiormente dal punto finale della retta, cioè il $(dp/dz)(1/u)$ calcolato alla velocità massima raggiunta, questo perché la dispersione dei dati a velocità basse è inferiore rispetto al $\pm 25\%$ misurato invece a velocità più alte, significando che il coefficiente angolare della retta dipende in quantità maggiore dal comportamento della schiuma a velocità crescente.

Successivamente vengono presentati i grafici relativi al $(dp/dz)(1/u)$ rispetto alla velocità u suddivisi in: schiume dai 20mm ai 60mm di spessore (fig. 4.18), dagli

80mm ai 100mm di spessore (fig. 4.19) ed infine dai 120mm ai 140mm di spessore (fig. 4.20).

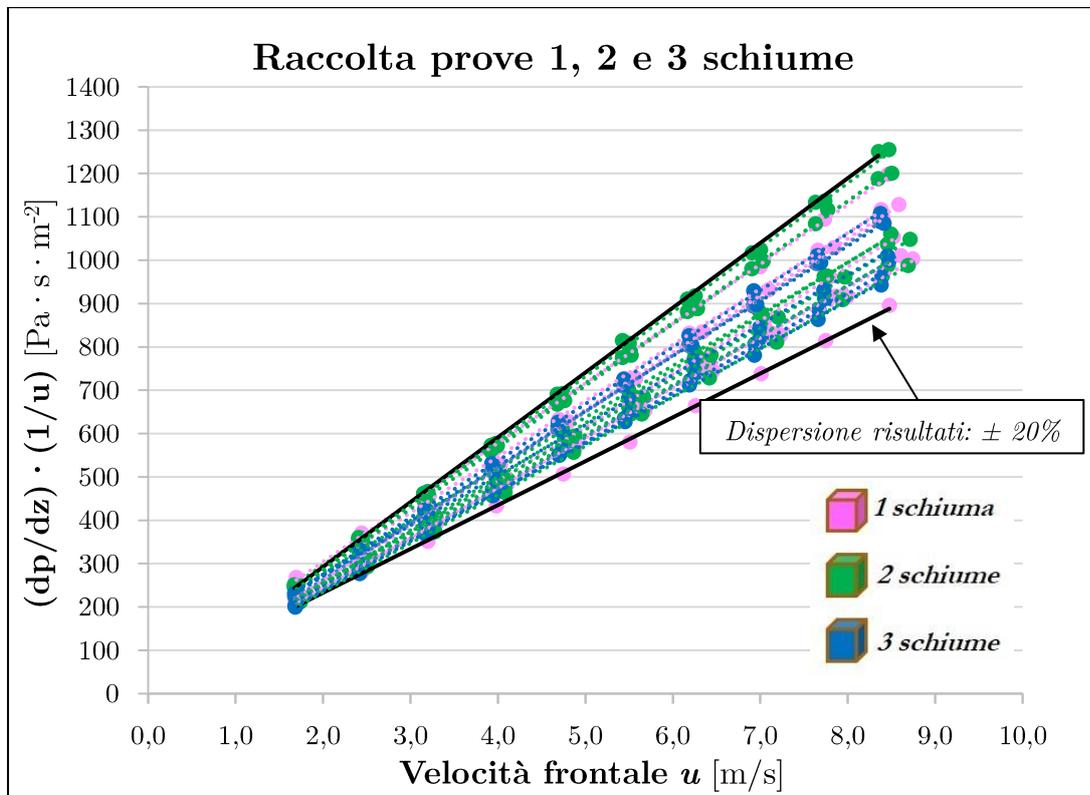


Figura 4.18: Linearizzazione del (dp/dz) rispetto alla velocità, spessori di 20, 40 e 60mm.

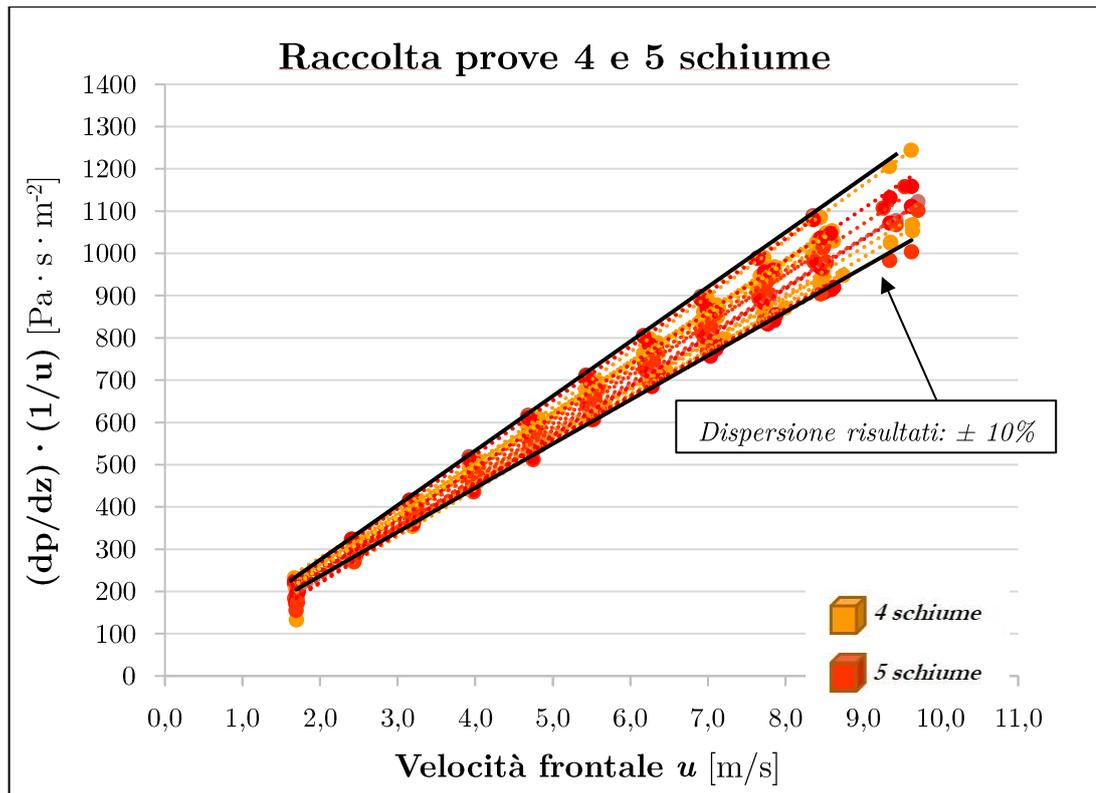


Figura 4.19: Linearizzazione del gradiente di pressione rispetto alla velocità, spessori di 80 e 100mm.

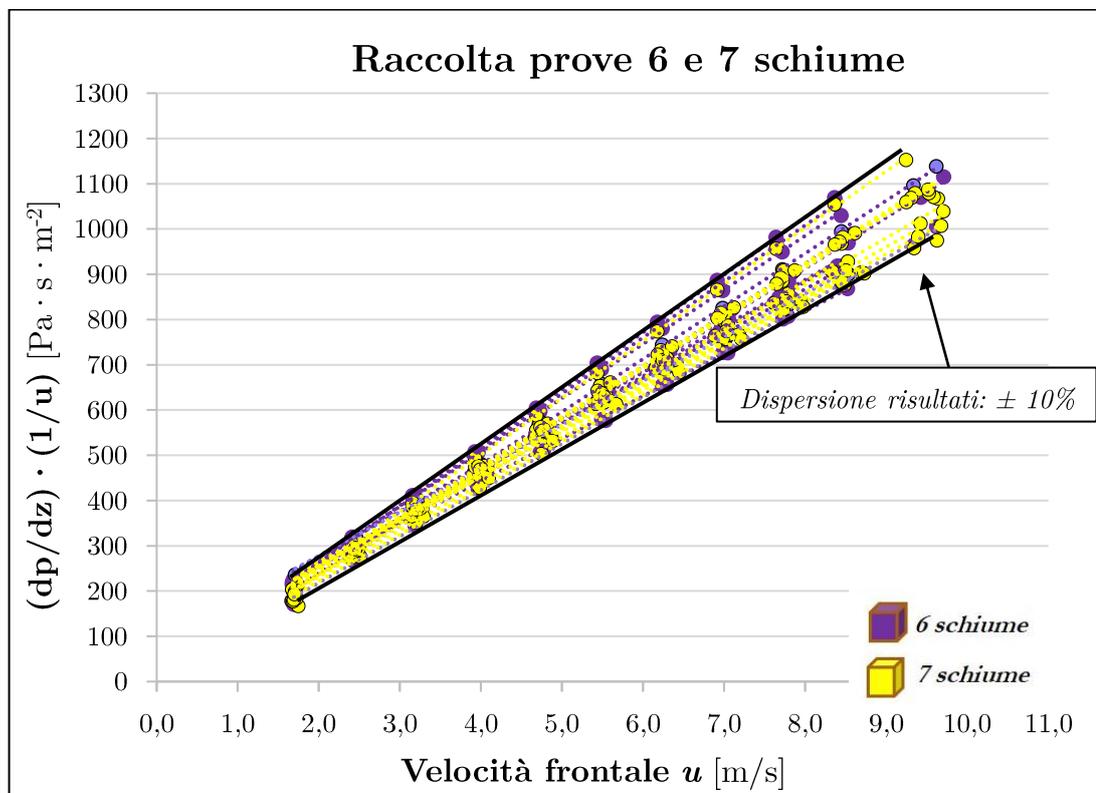


Figura 4.20: Linearizzazione del gradiente di pressione rispetto alla velocità, spessori di 120 e 140mm.

Appare subito definitivamente chiaro come all'aumentare dello spessore, anche in questo caso, la dispersione dei risultati diminuisca. In particolare, si evince come, in corrispondenza degli 80mm di spessore (equivalenti a 4 schiume impilate assieme), si sia già giunti ad un cono di dispersione dei risultati costante pari al $\pm 10\%$, ulteriore conferma della teoria dell'esistenza dello *spessore critico*. Per questo tipo di schiume in questo *range* di velocità tale spessore critico sembra dunque effettivamente aggirarsi intorno agli 80mm, come precedentemente suggerito.

4.3.3.2 Calcolo della permeabilità k

Grazie alla linearizzazione rispetto alla velocità frontale, come già citato in precedenza, è possibile calcolare diversi parametri caratteristici delle schiume; in questo caso verrà posta maggiore attenzione al calcolo del parametro k , ovvero la permeabilità.

Nella fattispecie, per ogni singola prova sperimentale effettuata durante l'esperienza in laboratorio, dai dati di perdita di carico misurati è stato possibile calcolare, tramite il metodo descritto in precedenza, una permeabilità k . La raccolta di tutti i calcoli effettuati concernenti tale parametro ha dato frutto a questa tabella (tab. 4.11).

Tabella 4.11: Raccolta dati di k , calcolato per tutte le prove sperimentali effettuate.

k 1 schiuma	k 2 schiume	k 3 schiume	k 4 schiume	k 5 schiume	k 6 schiume	k 7 schiume
[m ²]	[m ²]	[m ²]	[m ²]	[m ²]	[m ²]	[m ²]
6,21E-07	1,08E-06	4,35E-06	2,05E-06	1,51E-06	2,34E-06	7,36E-07
6,24E-07	8,44E-07	2,18E-06	1,05E-06	1,28E-06	1,20E-06	3,20E-07
6,09E-07	3,56E-06	1,04E-06	1,54E-06	9,70E-07	6,78E-07	9,29E-07
-1,18E-05	2,79E-06	6,75E-07	8,74E-07	4,02E-07	1,45E-06	5,14E-07
-8,80E-06	4,48E-07	2,06E-06	3,78E-07	5,44E-07	2,63E-07	3,31E-07
-3,26E-06	1,78E-06	4,43E-07	6,65E-07	4,89E-07	2,31E-07	4,15E-07
7,14E-07	-2,85E-06	1,42E-06	3,29E-07	4,00E-07	2,73E-07	4,65E-07
1,42E-06	-3,60E-06		3,58E-07	1,87E-06	3,91E-07	5,67E-07
1,03E-05	-1,75E-06		1,07E-06	3,50E-07	4,16E-07	4,25E-06
8,69E-06	2,75E-06		4,49E-07	2,52E-07	2,73E-07	2,21E-07
3,33E-06	9,04E-07		7,64E-07	3,60E-07	8,71E-07	1,25E-07
	1,81E-06		1,22E-06	9,96E-07	5,79E-07	1,58E-07
			9,19E-07		7,25E-07	
			1,77E-07			
			1,41E-06			
Media⁸:						
3,49E-06	1,55E-06	1,74E-06	8,45E-07	7,85E-07	7,45E-07	7,52E-07
Deviazione % della media (σ/media):						
117,8%	65,6%	70,5%	59,8%	65,0%	78,7%	68,5%

Da una prima analisi si nota come a valori di spessore inferiori la distribuzione dei risultati di permeabilità sia estremamente disuniforme ed eterogenea, con valori di k

⁸ Nel calcolo della media non sono state considerate le prove da cui è risultato un k minore di zero.

che oscillano anche di uno o due ordini di grandezza, arrivando persino a sfiorare nel campo dei numeri negativi.

Tuttavia, nella letteratura scientifica attuale, i risultati di permeabilità presentati da altri autori come *Mancin et al.*⁹ appaiono estremamente diversi rispetto a quelli ottenuti autonomamente, ed anche rispetto a quelli appartenenti ad altri autori. È doveroso precisare che sebbene un valore di k negativo non abbia alcun senso fisico, questi dati non sono stati eliminati nella post-produzione analitica dei risultati sperimentali, sebbene in prima istanza si sia ipotizzato che fossero derivanti da prove sperimentali fallate da qualche tipo di incongruenza o anomalia.

Tale effetto, inizialmente attribuito a qualche tipo di vizio procedurale nel praticare le prove sperimentali o addirittura imputato a uno o più difetti nell'apparato sperimentale utilizzato, non ha cessato di manifestarsi nemmeno dopo aver apportato ulteriori modifiche all'apparato sperimentale e/o al processo di fabbricazione dei provini di schiuma metallica, effettuate con l'unico scopo di garantire la totale ed assoluta certezza che non fossero presenti fughe d'aria all'interno del canale, che non fossero presenti intervalli di vuoto fra le schiume e che l'aria non scavalcasse il provino, una volta sigillate le schiume entro il canale aeraulico.

La mancata scomparsa di questo effetto ha portato a pensare che vi fosse invece un difetto di tipo teorico nell'analisi dei dati sperimentali, i quali, se esaminati da un nuovo punto di vista, avrebbero risposto al dubbio riguardante la discrepanza fra i dati raccolti da altri autori e quelli ottenuti autonomamente.

Il primo fattore che ha gettato dubbio sull'analisi presentata da altri autori è relativo all'enorme discrepanza fra la dispersione dei dati relativi alla permeabilità k ed invece la modesta dispersione presentata dai risultati relativi alle mere perdite di carico, ovvero la "reale" grandezza misurata durante la prova. Prendendo ad esempio alcune prove sperimentali, effettuate in giornate diverse, ma sugli stessi campioni, si può evincere come, mantenendo fissi tutti gli altri parametri quali:

- Numero e tipo di schiume a costituire il provino *da test*;
- Ordine e verso delle schiume nel canale aeraulico;
- Tipo di sigillatura all'aria;
- *Range* di velocità adoperato durante la prova;

la permeabilità calcolata sulle due prove, pur avendo tali parametri in comune, differisce con magnitudine sproporzionalmente aumentata. Sussecativamente vengono presentati alcuni esempi (tabb. 4.12, 4.13 & 4.14):

⁹ Kumar P., Topin F., "State-of-the-Art of Pressure Drop in Open-Cell Porous Foams: Review of Experiments and Correlations", Journal of Fluids Engineering, Vol. 139. 111401-13, (2017)

Tabella 4.12: Prove effettuate con i campioni: 1, 2, 3, 4, 5, 6.

Perdite di carico al diaframma [Pa]	Schiume 2+3+4+1 Perdite di carico [Pa]	Schiume 3+4+5+6 Perdite di carico [Pa]	Variazione %
42,0	64,2	63,8	-0,62%
72,0	108,0	108,2	+0,19%
112,0	168,0	163,8	-2,50%
160,0	237,0	232,0	-2,11%
216,0	318,0	312,0	-1,89%
280,0	409,0	401,0	-1,96%
351,0	511,0	501,0	-1,96%
430,0	623,0	612,0	-1,77%
516,0	750,0	731,0	-2,53%
<i>a</i> [kg·m ⁻³ ·s ⁻¹]	11,61	20,70	+78,45%
<i>b</i> [kg·m ⁻⁴]	112,8	120,0	+6,38%
<i>k</i> [m ²]	1,59E-06	8,86E-07	-44,28%
<i>f</i> [ad.]	0,121	0,095	-21,49%
<i>C</i> [m ⁻¹]	95,58	100,63	+5,28%

In questo caso le schiume utilizzate, è ben visibile, non sono le stesse, contravvenendo ai primi due punti citati in precedenza. Tuttavia, si può notare come, osservando i dati di perdita di carico relativi alle due schiume, essi siano estremamente simili, con una discrepanza del $\pm 2\%$ circa, ben al di sotto del $\pm 5\%$ precedentemente citato con riferimento alle prove sperimentali.

L'oscillazione dei dati primigeni da cui viene derivata la retta, e conseguentemente i coefficienti *a* e *b*, provoca una vera "esplosione" dell'errore, la quale si ripercuote sugli stessi coefficienti (in particolar modo *a*) e sul valore dei parametri da essi derivanti.

Nelle tabelle successive verrà, per fugare ulteriori dubbi, fatto riferimento a prove effettuate con le **stesse schiume** posizionate nello **stesso ordine**, in tal modo si potrà comprendere come questo effetto di divergenza della retta dipenda non da una differenza di una schiuma rispetto ad un'altra ma piuttosto di un errore nell'applicazione del modello teorico al caso in essere, causando un'errata interpretazione dei risultati.

Tabella 4.13: Prove effettuate con i campioni: 1, 2, 3, 5.

Perdite di carico al diaframma [Pa]	Schiume 3+5+1+2 (a) Perdite di carico [Pa]	Schiume 3+5+1+2 (b) Perdite di carico [Pa]	Variazione %
42,0	60,3	63,4	+5,14%
72,0	102,0	106,0	+3,92%
112,0	155,0	159,8	+3,10%
160,0	217,0	223,0	+2,76%
216,0	291,0	293,0	+0,69%
280,0	375,0	376,0	+0,27%
351,0	462,0	467,0	+1,08%
430,0	565,0	566,0	+0,18%
516,0	676,0	658,0	-2,66%
<i>a</i> [kg·m ⁻³ ·s ⁻¹]	32,2	55,95	+73,76%
<i>b</i> [kg·m ⁻⁴]	107,6	105,1	-2,32%
<i>k</i> [m ²]	5,76E-07	3,29E-07	-42,90%
<i>f</i> [ad.]	0,069398	0,050709	-26,93%
<i>C</i> [m ⁻¹]	91,4506	88,43256	-3,30%

Tabella 4.14: Prove effettuate con i campioni: 1, 2, 3, 4.

Perdite di carico al diaframma [Pa]	Schiume 1+2+3+4 (a) Perdite di carico [Pa]	Schiume 1+2+3+4 (b) Perdite di carico [Pa]	Variazione %
42,0	65,0	63,0	-3,08%
72,0	110,1	107,2	-2,63%
112,0	170,7	166,0	-2,75%
160,0	242,0	236,0	-2,48%
216,0	324,0	313,0	-3,40%
280,0	417,0	400,0	-4,08%
351,0	520,0	502,0	-3,46%
430,0	633,0	609,0	-3,79%
516,0	763,0	723,0	-5,24%
<i>a</i> [kg·m ³ ·s ⁻¹]	13,9	26,43	-90,14%
<i>b</i> [kg·m ⁻⁴]	128,3	119,8	-6,63%
<i>k</i> [m ²]	1,32E-06	7E-07	-47,16%
<i>f</i> [ad.]	0,12431	0,084889	-31,71%
<i>C</i> [m ⁻¹]	100,60	99,03	-6,06%

Dalle due tabelle appena presentate si può estrapolare un'ulteriore conclusione. Osservando che, anche in questo caso, la variazione percentuale dei dati originali di perdita di carico non supera quasi mai la soglia del $\pm 5\%$, tenendo inoltre conto del fatto che gli strumenti di misura sono meno precisi a fondo scala, si evince come, di fronte ad una modesta variazione della perdita di carico in corrispondenza della schiuma, la pendenza della retta subisca variazioni sproporzionalmente più forti, influenzando direttamente il valore di a e, conseguentemente, della permeabilità k . Notevole è il fatto che, nella letteratura scientifica esaminata, invece, questo problema non compaia, o non ne venga fatta menzione, oppure ancora venga sì riferita l'esistenza di tale dispersione, ma non nell'entità riscontrata durante la trattazione del caso studio in esame. Per tali motivi, volendo sviscerare questo comportamento nei dettagli, si è deciso di condurre uno studio più approfondito sul termine k .

4.3.4 Studio sulla dispersione della permeabilità k

Il principale problema riscontrato volendo confrontare i risultati sperimentali ottenuti autonomamente con quelli invece derivanti da studi di laboratori

indipendenti è l'evidente mancanza di coerenza fra gli uni e gli altri; nella fattispecie, mentre i risultati esterni mostrano poca dispersione delle rette derivanti dalla linearizzazione del gradiente di perdita di carico, i nostri risultati sperimentali mostravano un cono d'errore più marcato, entro il quale il valore dei coefficienti a e b oscilla visibilmente.

Si è già profusamente specificato che l'errore, durante la realizzazione di una prova sperimentale, è di fatto imprescindibile, e accompagna indissolubilmente la misurazione di una grandezza fisica. Nel caso in esame infatti l'incertezza è stata calcolata previamente, seguita dalla presentazione dei risultati ottenuti, volendo dare maggiore correttezza ed autorità alle conclusioni che ne hanno fatto seguito, ed anche, come già affermato, perché costituiscono una parte imprescindibile di un esperimento.

Sull'errore relativo al $(dp/dz)(1/u)$, non a caso, si basa la presente trattazione, fondata sul ricercare il motivo per il quale, secondo i dati riscontrati finora, il parametro k sembri non essere, contrariamente a quanto suggerito da altri autori, un parametro adatto al confronto fra le schiume oggetto del caso studio, se non addirittura dannoso ai fini di trarre conclusioni definitive riguardanti la caratterizzazione di questi materiali porosi.

4.3.4.1 Cono d'errore ed estrapolazione di k

Per proseguire l'indagine viene proposta una situazione ipotetica, ovvero che ci si trovi di fronte alla linearizzazione del gradiente di perdita di carico della i -esima prova sperimentale; è indifferente sapere a quanto ammontano le perdite di carico o conoscere la natura delle schiume, in questo caso, poiché la valutazione che verrà mossa sarà esclusivamente di carattere qualitativo teorico.

Dal capitolo III, sez. 3.3.3.3, viene tratta la formula per ricavare l'ammontare dell'incertezza sul calcolo del $(dp/dz)(1/u)$, pari circa, come specificato in precedenza, al $\pm 2,2\%$.

Viene di seguito proposta la già sopracitata i -esima linearizzazione del gradiente (fig. 4.18), a scopo puramente illustrativo, comprensiva inoltre delle barre d'errore posizionate sia rispetto all'asse delle ascisse che delle ordinate.

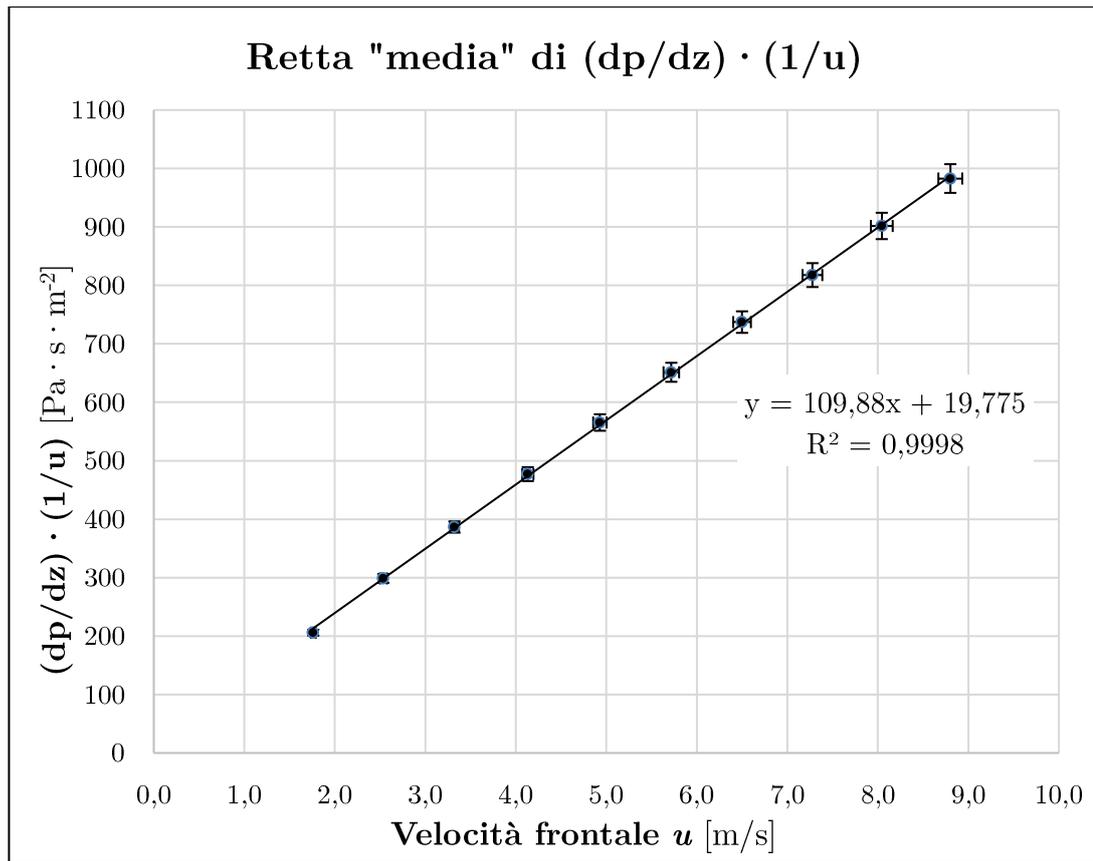


Figura 4.21: Linearizzazione del valor medio di $(dp/dz)(1/u)$ rispetto alla velocità frontale.

Da questa figura si può facilmente estrapolare, grazie alla funzione insita nel programma di mostrare l'equazione relativa alla linea di tendenza, il valore dei coefficienti a e b , in questo caso rispettivamente:

$$a = 19,775;$$

$$b = 109,88;$$

Il cono d'errore del $\pm 2,2\%$ viene delineato dai limiti estremi delle barre d'errore sull'asse Y.

Considerando che, come è stato osservato, piccole oscillazioni dei dati di partenza generano grandi variazioni delle grandezze derivate allora si vorrà provare ad estremizzare la pendenza della retta variando l'entità delle perdite di carico, mantenendole categoricamente entro il cono d'incertezza, senza mai contravvenire a questo precetto.

Per definizione stessa di 'incertezza', un dato può oscillare entro al suo cono d'errore senza per questo perdere di veridicità, quindi i dati di perdita di carico originali possono certamente essere modificati a proprio piacimento, cosicché la retta assuma la pendenza desiderata, purché non si contravvenga a quanto appena affermato, senza quindi sfiorare il cono d'errore designato.

Volendo illustrare quanto appena affermato si determineranno due rette, di pendenza estremizzata rispetto a quella “media” di partenza; una che massimizzi il valore di a mantenendosi entro il cono d’errore, l’altra retta che lo minimizzi (fig. 4.19).

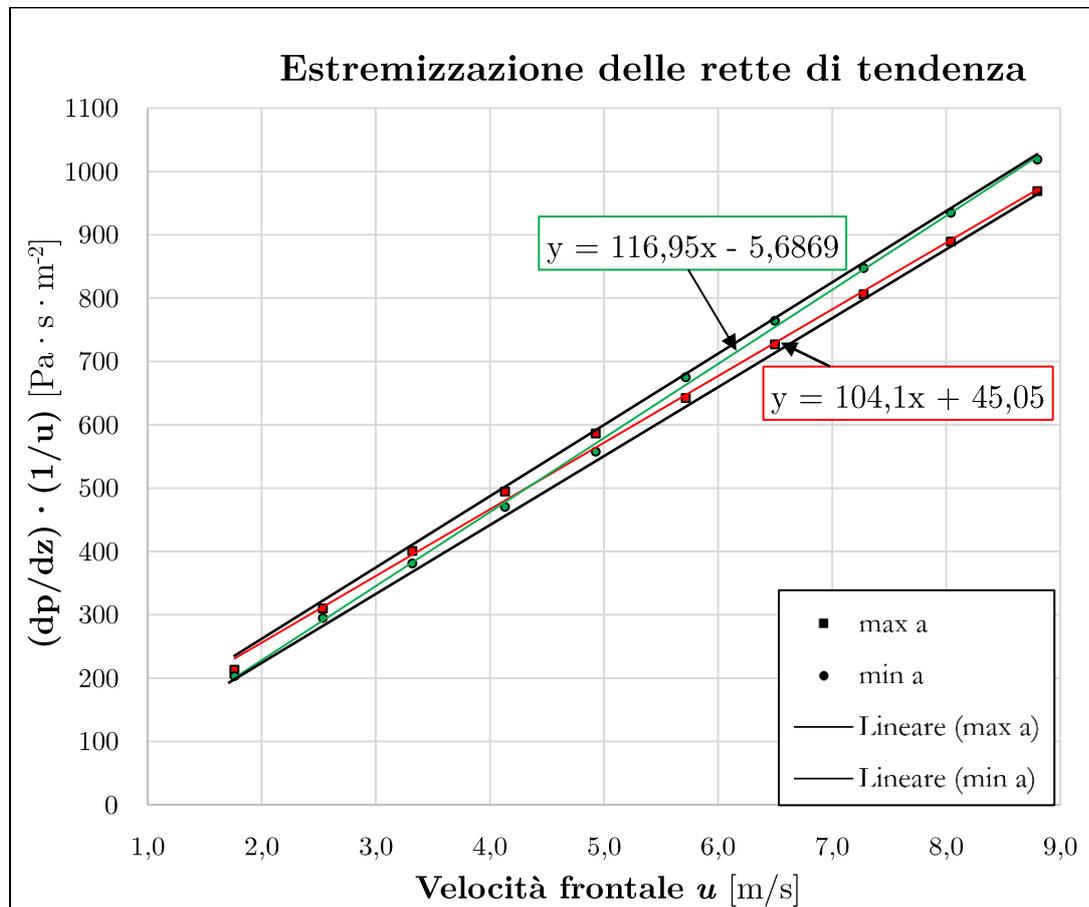


Figura 4.22: Estremizzazione delle due linee di tendenza.

La serie denominata ‘max a’ è una serie di dati originata dalla linea di tendenza media del $(dp/dz)(1/u)$, modificata *ad hoc* per massimizzare il valore del termine noto della retta di tendenza della serie, rispettando al contempo il limite superiore di non variare i dati originari oltre il 2,2%. Allo stesso modo, la serie di dati denominata ‘min a’ è originata ugualmente dalla serie di dati relativa al valor medio di $(dp/dz)(1/u)$, ma stavolta provando a minimizzare il valore del termine noto della retta, il quale, come si evince dall’equazione in alto (fig. 4.19) sfocia persino nei valori negativi. Le due rette “di confine” di spessore superiore delimitano invece il cono d’incertezza pari al $\pm 2,2\%$.

Le due equazioni delle rette, ripetute anche nel grafico, vengono riportate successivamente:

$$' \max a' \rightarrow y = a + b \cdot u = 45,05 + 104,1x;$$

$$' \min a' \rightarrow y = a + b \cdot u = -5,69 + 116,9x;$$

dalle quali si possono facilmente ricavare i parametri fluidodinamici k , f e C . Ricordando le equazioni 4.2, 4.3 & 4.4:

$$k = \frac{\mu}{a} \quad (4.2) \quad f = \frac{b \cdot \sqrt{k}}{\rho} \quad (4.3) \quad C = \frac{b}{\rho} \quad (4.4)$$

Tabella 4.15: Confronto fra i parametri fluidodinamici nei tre casi analizzati.

Serie	a	b	k	f	C
	[kg·m ⁻³ ·s ⁻¹]	[kg·m ⁻⁴]	[m ²]	[ad.]	[m ⁻¹]
‘medio’	19,78	109,9	9,31E-07	0,089	92,73
‘max a’	-5,49	115,7	-3,53E-06	N/A	97,61
‘min a’	45,05	104,1	4,09E-07	0,056	87,85
Variazione	-	-	-	-	-
[riferimento]	-127,76%	+5,28%	-479,16%	N/A	+5,26%
[‘medio’]	+127,76%	-5,28%	-56,07%	-37,08%	-5,26%

A questo punto è possibile osservare il riscontro delle modifiche effettuate sui dati originali ed il loro effetto.

A fronte delle modeste variazioni dei dati originari è facile notare come il parametro a subisca le variazioni più consistenti, il fatto che queste variazioni siano speculari non stupisce affatto, dato che le due rette di tendenza costruite *ad hoc* sono basate sulla stessa retta di partenza, la quale ha subito due esasperazioni speculari.

Il parametro k è proporzionale ad a , quindi si evince come l’alterazione consistente di quest’ultima variabile si ripercuota poi sulla permeabilità. Rammentando poi che valori negativi della permeabilità perdono di qualsivoglia significato fisico, dai quali è poi impossibile determinare un valore della variabile f , allora appare evidente come la valutazione del k per la caratterizzazione di una schiuma, in questo caso, sia controproducente oppure persino impossibile.

Concludendo, si può affermare la linearizzazione del $(dp/dz)(1/u)$ costituisca, di fatto, la rappresentazione di una schiuma, ed in quanto tale da essa si possano ricavare parametri che la caratterizzino, come ad esempio la permeabilità k , fondamentale nella descrizione di un mezzo poroso. Tuttavia, la consistenza richiesta nella definizione di un parametro sperimentale non trova riscontro nelle prove effettuate, rivelando piuttosto che la dispersione di tale variabile ne impedisce il corretto utilizzo come parametro definente. Naturalmente l’analisi presentata ha

considerato unicamente una retta, mostrando i limiti di applicabilità dell'utilizzo del k . Tuttavia, è doveroso notare che l'analisi non si è limitata a quanto illustrato, ma si è estesa a tutto il campo delle altre prove sperimentali effettuate, volendo avvalorare la tesi presentata.

Seguentemente, si è proceduto a ripetere lo stesso criterio di analisi agli andamenti medi del $(dp/dz)(1/u)$, suddivisi per spessore della schiuma (tab. 4.16).

Tabella 4.16: Raccolta dati su tutti gli spessori, studio sulla variazione dei parametri k , f , C .

N° schiume	Serie	a	b	k	f	C
		[kg·m ⁻³ ·s ⁻¹]	[kg·m ⁻⁴]	[m ²]	[ad.]	[m ⁻¹]
1 Schiuma	'med'	14,38	114,4	1,28E-06	0,109	96,57
	'max a'	45,74	107,2	4,03E-07	0,057	90,50
	'min a'	-16,98	121,6	-1,08E-06	N/A	102,62
2 Schiume	'med'	18,67	113,3	9,87E-07	0,095	95,63
	'max a'	49,93	106,2	3,69E-07	0,054	89,59
	'min a'	-12,59	120,5	-1,46E-06	N/A	101,67
3 Schiume	'med'	17,36	109,6	1,06E-06	0,095	92,45
	'max a'	47,47	102,7	3,88E-07	0,054	86,63
	'min a'	-12,76	116,5	-1,44E-06	N/A	98,27
4 Schiume	'med'	19,26	107,7	9,56E-07	0,089	90,91
	'max a'	48,94	100,9	3,76E-07	0,052	85,18
	'min a'	-10,41	114,5	-1,77E-06	N/A	96,64
5 Schiume	'med'	11,9	107,0	1,55E-06	0,112	90,31
	'max a'	40,88	100,4	4,51E-07	0,057	84,70
	'min a'	-17,1	113,7	-1,08E-06	N/A	95,93
6 Schiume	'med'	30,13	102,5	6,11E-07	0,068	86,51
	'max a'	59,11	95,9	3,12E-07	0,045	80,95
	'min a'	1,145	109,1	1,61E-05	0,369	92,08
7 Schiume	'med'	23	102,1	8,01E-07	0,077	86,15
	'max a'	51,33	95,6	3,59E-07	0,048	80,69
	'min a'	-5,34	108,6	-3,45E-06	N/A	91,62

Naturalmente la sola presentazione dei crudi dati non riesce a racchiudere il significato di questa elaborazione. Si nota tuttavia, una chiara ed evidente variazione dei parametri a e k , senza ancora che sia stata però quantificata precisamente. Tale variazione non stupisce, in quanto già mostrata in precedenza durante la quantificazione dell'errore insito nella linearizzazione del gradiente di pressione adimensionalizzato rispetto alla velocità.

Successivamente viene quantificata questa oscillazione dei dati (tab. 4.17), dalla quale si potranno derivare conclusioni più precise e formali.

Tabella 4.17: Variazione percentuale dei parametri sopraelencati in tab. 4.13

Variazione % dei valori	Serie	<i>a</i> [kg·m ⁻³ ·s ⁻¹]	<i>b</i> [kg·m ⁻⁴]	<i>k</i> [m ²]	<i>f</i> [ad.]	<i>C</i> [m ⁻¹]
1 Schiuma	‘med’	-	-	-	-	-
	‘max a’	+218,08%	-6,28%	-68,56%	-47,45%	-6,28%
	‘min a’	-218,08%	+6,27%	-184,69%	N/A	+6,27%
2 Schiume	‘med’	-	-	-	-	-
	‘max a’	+167,43%	-6,32%	-62,61%	-42,71%	-6,32%
	‘min a’	-167,43%	+6,32%	-248,29%	N/A	+6,32%
3 Schiume	‘med’	-	-	-	-	-
	‘max a’	+173,44%	-6,29%	-63,43%	-43,33%	-6,29%
	‘min a’	-173,50%	+6,30%	-236,05%	N/A	+6,30%
4 Schiume	‘med’	-	-	-	-	-
	‘max a’	+154,10%	-6,30%	-60,65%	-41,22%	-6,30%
	‘min a’	-154,05%	+6,30%	-285,01%	N/A	+6,30%
5 Schiume	‘med’	-	-	-	-	-
	‘max a’	+243,53%	-6,21%	-70,89%	-49,40%	-6,21%
	‘min a’	-243,70%	+6,22%	-169,59%	N/A	+6,22%
6 Schiume	‘med’	-	-	-	-	-
	‘max a’	+96,18%	-6,44%	-49,03%	-33,20%	-6,44%
	‘min a’	-96,20%	+6,44%	+2531,44%	+446,00%	+6,44%
7 Schiume	‘med’	-	-	-	-	-
	‘max a’	+123,17%	-6,34%	-55,19%	-37,30%	-6,34%
	‘min a’	-123,22%	+6,35%	-530,71%	N/A	+6,35%
Variazione media¹⁰		167,99%	6,31%	329,72%	92,58%	6,31%

Si evince chiaramente come i parametri *a* e *k* abbiano subito variazioni inconcepibilmente alte rispetto alla modesta oscillazione dei dati originali di perdita di carico.

La spiegazione a questo fenomeno, ormai ampiamente illustrato, è presto fornita: la determinazione della permeabilità, come già chiarito, dipende unicamente dal parametro *a*, il quale rappresenta il valore con cui la retta $y = a + b \cdot u$ intercetta l’asse delle ordinate nel grafico. Tuttavia, se tale retta intercetta l’asse delle ordinate

¹⁰ La ‘Variazione media’ è stata calcolata senza tener conto del segno, intendendola esclusivamente come un indicatore dell’alterazione subita dai parametri.

“troppo” vicino all’origine, la semplice oscillazione dei dati sperimentali (dovuta all’incertezza dello strumento di misura) propaga l’errore esplosivamente, in quanto la retta si sta avvicinando allo 0, corrispondente all’origine.

Il motivo per il quale il valore dell’intercettazione della retta passi così vicino all’origine, conseguenza dell’intero problema di esplosione dell’errore è da ricercare nella pendenza definita dal parametro b , il quale, tuttavia, non mostra segni di profonda variazione, anche a seguito di manomissione da parte del redattore, col preciso scopo di esasperarne gli effetti sui parametri sopracitati. Il fatto che tale dispersione sia di lieve entità rispetto a quella di a suggerisce che il coefficiente angolare della retta sia, in effetti, un parametro circa costante, poco incline ad alterazioni che deteriorerebbero la validità del risultato sperimentale. Allo stesso modo anche i parametri dipendenti da b , quale è il C , mostrano ovviamente gli stessi segni di variazione, limitata circa al $\pm 6\%$ rispetto al valor medio di partenza.

La limitata variabilità di C fa supporre che una caratterizzazione sperimentale delle schiume metalliche quali mezzi porosi basata non più sul fallace parametro k , bensì su C , possa fornire conclusioni meglio verificabili e coerenti fra di loro.

Esaminando la letteratura scientifica in nostro possesso si è riscontrato come il parametro C presentasse una maggiore riscontrabilità e costanza con le schiume testate da altri team di ricerca, ammettendo di effettuare un confronto fra schiume dello stesso tipo, con porosità e materiale costituente simili.

Nella figura sottostante (fig. 4.23) è riportato l’andamento medio dei risultati sperimentali, riferiti stavolta al parametro C , per verificarne la tendenza, supposta circa costante.

Seguendo l’equazione 4.11:

$$\left(-\frac{dp}{dz}\right) \cdot \frac{1}{u} = \frac{\mu}{K} + \frac{\rho \cdot f \cdot u}{\sqrt{K}} = a + b \cdot u = a + C\rho u \quad (4.11)$$

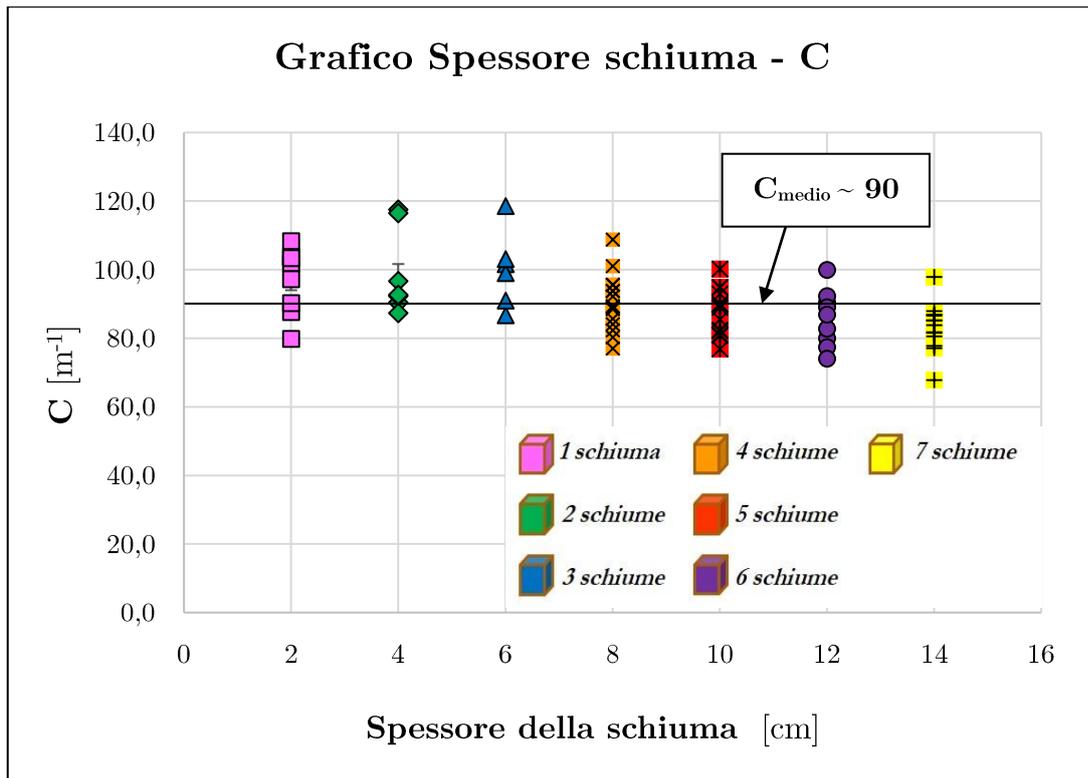


Figura 4.23: Andamento del parametro C al variare dello spessore della schiuma.

Dalla fig. 4.23 ivi riportata è possibile ricavare un valor medio del parametro C , compreso in un *range* complessivo **fra 60 e 120**, con un andamento mediamente costante lungo l'asse delle ascisse. Tale *range*, se si considera unicamente l'andamento medio all'aumentare dello spessore, può essere ridotto all'intervallo **fra 80 e 100**, con un C univoco medio intorno a **90**, per queste schiume, in buon accordo con quanto trovato da altri studi. Autori come *Kamath et al.*, nel corso della loro sperimentazione¹¹, hanno ricavato un valore di C molto simile, compreso circa **fra 90 e 160**, sperimentando su schiume anch'esse fabbricate in lega di alluminio e con porosità e PPI simili. È inoltre interessante notare come autori come *Tadrist et al.*¹² e *Boomsma et al.*¹³, in due differenti studi, condotti entrambi su schiume a 10 PPI e in lega di alluminio, abbiano calcolato valori di C oscillanti intorno a **110**, quindi non dissimili dai risultati ottenuti durante lo svolgimento di questa esperienza sperimentale. È inoltre interessante citare i risultati ottenuti da *De Schampheleire et*

¹¹ Kamath P.M., Balaji C., Venkateshan S.P., "Convection heat transfer from aluminium and copper foams in a vertical channel – An experimental study", International Journal of Thermal Sciences, Vol. 64, pp. 1–10, (2014)

¹² Tadrist L., Miscevic M. Rahlia O., Topin F., "About the use of fibrous materials in compact heat exchangers", Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 28, Issues 2–3, pp. 193-199, (2004)

¹³ Boomsma K., Poulikakos D., "The effects of compression and pore size variations on the liquid flow characteristics in metal foams", Journal of Fluids Engineering, Vol. 124, Issue: 1, pp. 263-272, (2001)

al. ¹⁴, i quali, attraverso una simulazione numerica basata su un modello computazionale tridimensionale, hanno effettuato simulazione numerica, ottenendo dei risultati di C in un *range* compreso fra **60** e **120**, precisamente come quello ottenuto in questo studio.

Tabella 4.18: Rassegna dei risultati di C in letteratura, confrontati con i risultati ottenuti.

Autore	C [m^{-1}]
<i>Kamath et al.</i>	90÷160
<i>Tadrist et al.</i>	114÷128
<i>Boomsma et al.</i>	110
<i>De Schampheleire et al.</i>	60÷120
Risultato di riferimento	90 <i>range: 60÷120</i>

4.3.5 Rappresentazione adimensionale dei risultati sperimentali

Confacentemente alla metodologia descritta nella maggioranza della letteratura sperimentale esaminata, si è altresì proceduti a rappresentare i risultati sperimentali di perdita di carico ottenuti in un diagramma adimensionale confacente con il modello teorico scelto, ovvero quello di Darcy-Forchheimer, e che ne esprimesse la validità per il relativo esperimento.

Dal Capitolo II, sez. 2.2.2, è possibile osservare quale sia la relazione intercorrente fra i parametri Re_k e f_k . Il primo parametro, Re_k , è il *numero di Reynolds* definito a partire dalla permeabilità k ed è espressione diretta del livello di turbolenza del fluido sospinto nel canale aeraulico. Il parametro f_k è invece un parametro adimensionale esprime la perdita di carico per unità di lunghezza della schiuma, adimensionalizzato rispetto alla velocità e alla densità del fluido, entrambi i parametri vengono poi rappresentati in un diagramma bilogarithmico.

Ricordando le equazioni 2.7b & 2.8, il grafico viene rappresentato come segue (fig. 4.24):

¹⁴ De Schampheleire S., De Kerpel K., Ameer B., De Jaeger P., Bağcı Ö., De Paepe M., “A discussion on the interpretation of the Darcy equation in case of open-cell metal foam based on numerical simulations”, Materials (Basel, Switzerland), Vol. 9, Issue: 6, 409, (2016)

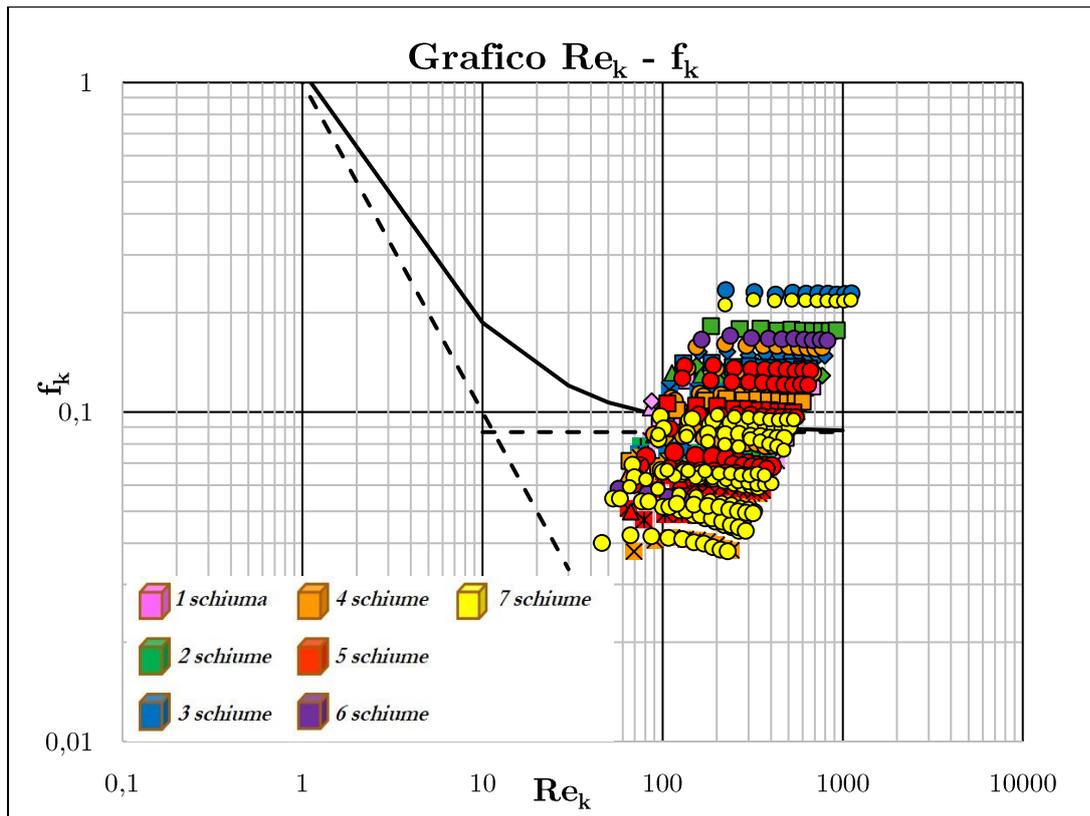


Figura 4.24: Grafico $Re_k - f_k$ per tutte le prove effettuate.

Come già suggerito dalle conclusioni tratte in precedenza, si può notare come il valore di f_k non tenda assolutamente ad un valore unico, costante per tutte le schiume, presentando piuttosto una dispersione in linea con quella relativa al parametro di permeabilità k , dal quale, non a caso, sia Re_k che f_k sono dipendenti.

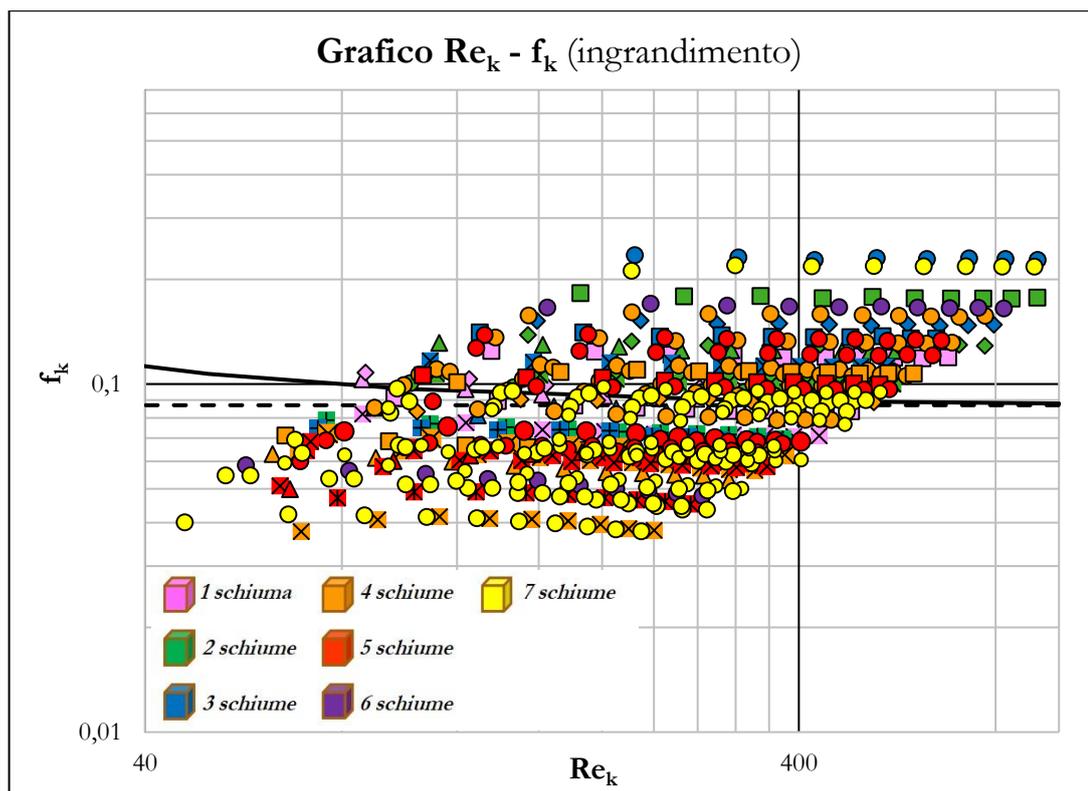


Figura 4.25: Grafico $Re_k - f_k$ per tutte le prove effettuate, ingrandimento.

Da questo ingrandimento si può notare come la dispersione dei risultati di f_k non segua una particolare tendenza al variare dello spessore, a differenza di prima, dove si è chiaramente osservata una netta diminuzione della dispersione dei risultati all'aumentare dello spessore. Tuttavia, ciò non stupisce né preoccupa, in quanto dalla stessa definizione di f_k si può ottenere la motivazione a questo comportamento: semplicemente, la stessa definizione di f_k , in quanto comprendente il parametro k , fa dipendere la dispersione del risultato da quella della permeabilità, mostratasi essere notevolmente incostante lungo tutta la serie delle prove sperimentali compiute.

L'andamento della singola prova sperimentale, indipendentemente dallo spessore, mostra una tendenza lievemente discendente, quasi costante, nell'intervallo descritto dal regime di Forchheimer (fig. 2.2).

4.3.6 Ulteriori prove sperimentali

Sono state condotte prove sperimentali aggiuntive, con schiume di diversa natura, volte a fornire supporto ulteriore alla tesi appena presentata, riguardante l'utilizzo di C quale parametro caratterizzante delle schiume metalliche.

Le schiume utilizzate, descritte in tab. 1.1, sono fabbricate in lega di nichel, con percentuali variabili di cromo e ferro a completamento. Su tali campioni di schiuma sono state effettuate prove sperimentali del tutto simili a quelle effettuate sui

campioni in alluminio a 10 PPI, con un *range* di velocità utilizzate compreso fra i 3,2 e 13 m/s circa.

4.3.6.1 Gradiente di perdita di carico: schiume NCX

La stessa procedura condotta precedentemente sulle schiume in lega di alluminio è stata ripetuta per quelle in lega di Ni-Cr, con lo scopo di verificare la validità delle conclusioni alle quali si era già giunti (fig. 4.26).

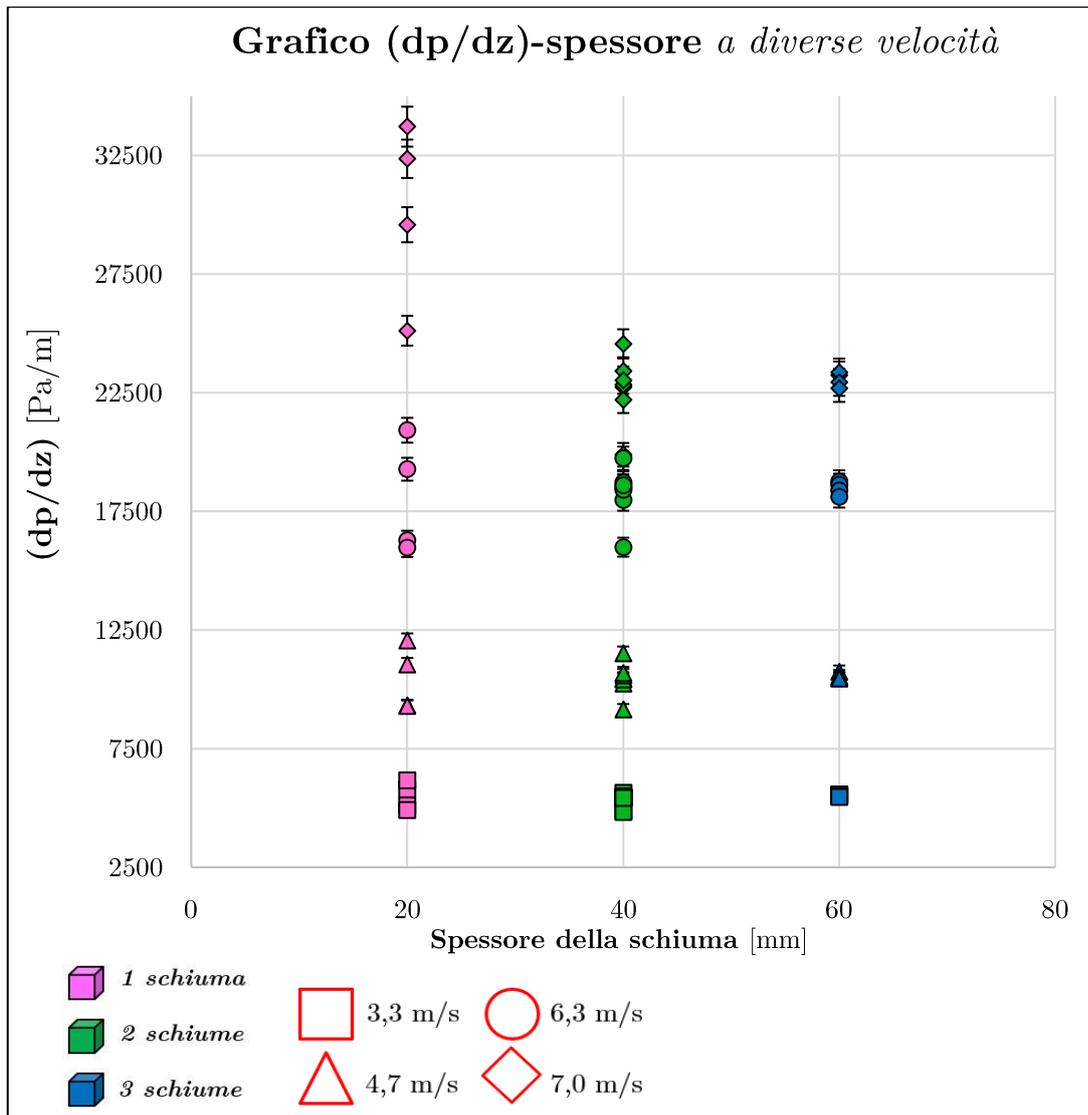


Figura 4.26: Grafico (dp/dz) - spessore, a diverse velocità, per schiume NCX1116.

Si nota anche in questo caso, come all'aumentare dello spessore, il gradiente lineare di perdita di carico diminuisca fino ad assestarsi ad un valore costante, riducendo al contempo la dispersione dei dati sperimentali, fino al punto in cui tale dispersione rientra all'interno della barra d'incertezza sulla misura riportata in figura, corrispondente, quest'ultima, circa al $\pm 2,0\%$.

Nella figura soprariportata le prove sperimentali sono state contemporaneamente suddivise per spessore, riportato sull'asse delle ascisse, e per velocità, per mostrare in maniera più chiara come l'assestamento dell'andamento del gradiente di pressione si manifesti a spessori più elevati con l'aumentare della velocità, a conferma del fatto che lo spessore critico della schiuma metallica è funzione dipendente alla velocità del fluido.

In questo caso, lo spessore critico della schiuma, inteso come lo spessore oltre il quale la dispersione totale dei dati rientra entro la soglia d'errore definita dalla barra d'incertezza, si può attestare fra i **50mm** e i **60mm** circa, uno spessore inferiore rispetto a quello determinato per le schiume d'alluminio. Tuttavia, quest'ultimo fatto non stupisce eccessivamente, in quanto sussistono vari dettagli che pendono in favore delle schiume NCX, come la minor porosità e il maggior numero di PPI, entrambe caratteristiche morfologiche che determinano una più repentina omogeneizzazione del flusso d'aria all'interno della schiuma, e quindi una susseguente omogeneizzazione dei dati.

4.3.6.2 Linearizzazione di Darcy-Forchheimer: schiume NCX

Così come per le schiume in lega d'alluminio, anche per le schiume NCX è stata effettuata la procedura di linearizzazione rispetto alla velocità, come descritto dall'eq. 4.1, ciò è rappresentato in fig. 4.27.

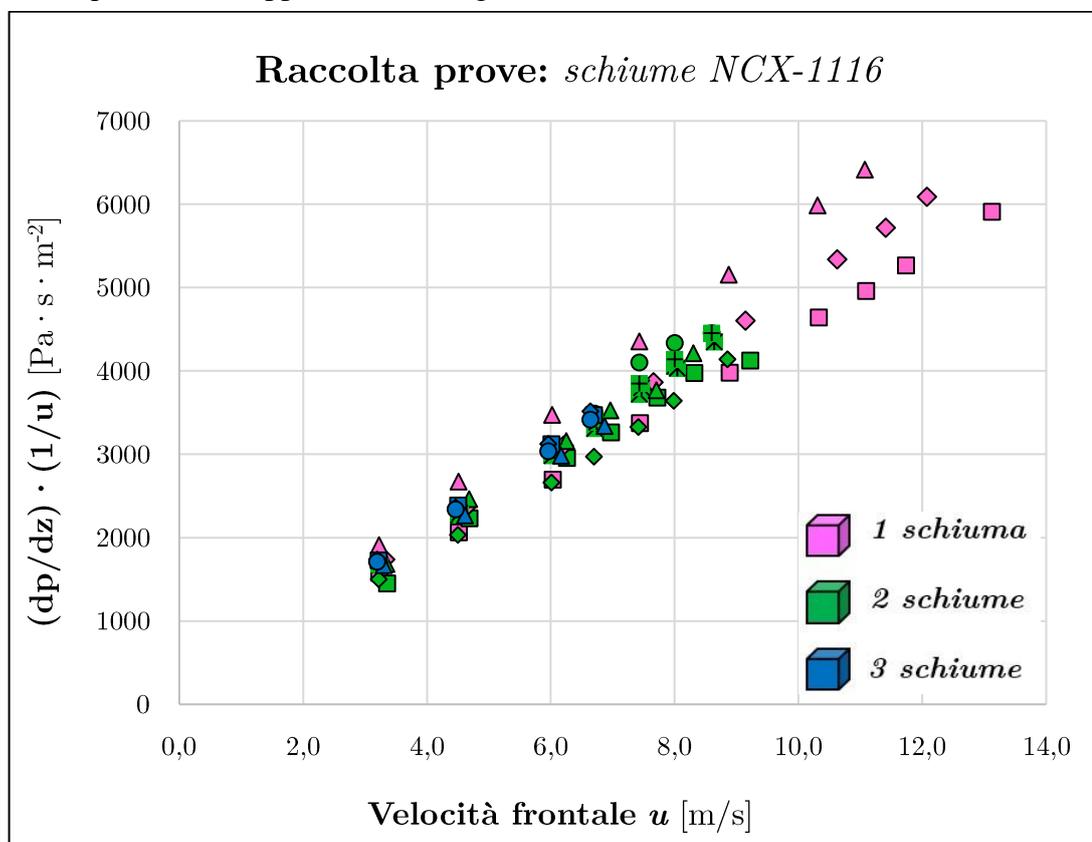


Figura 4.27: Linearizzazione del (dp/dz) rispetto alla velocità, schiume NCX1116

I dati, come proferito dall'eq. 4.1, seguono effettivamente un andamento lineare al variare della velocità frontale del fluido, con un indice di correlazione R^2 medio di 0,9993. Anche in questo caso il grafico in figura 4.27 mostra una riduzione della dispersione dei risultati sperimentali all'aumentare dello spessore della schiuma, in accordo con quanto precedentemente affermato.

4.3.6.3 Studio dei parametri fluidodinamici: schiume NCX

Anche in questo caso, è stato condotto uno studio riguardante i parametri fluidodinamici k , f e C . Nella tabella sottostante sono stati raccolti valori di questi parametri, in relazione al tipo di prova sperimentale effettuata (tab. 4.19).

Tabella 4.19: Raccolta parametri fluidodinamici a , b , k , f , C : schiume NCX1116.

	a	b	k	f	C
Prove a 1 schiuma	[kg·m ⁻³ ·s ⁻¹]	[kg·m ⁻⁴]	[m ²]	[ad.]	[m ⁻¹]
I	88,01	440	2,14E-07	0,168	344,1
II	60,05	496	3,36E-07	0,230	383,8
III	56,47	574	2,15E-07	0,276	440,4
Prove a 2 schiume					
I+II	-51,44	461	-3,7E-07		359,1
II+I	-22,14	469	-8,65E-07		369,4
III+II	64,75	491	2,94E-07	0,220	385,1
II+III	91,09	490	2,1E-07	0,186	385,4
I+III	49,74	496	3,83E-07	0,254	389,4
III+I	21,82	513	8,74E-07	0,396	402,4
III+I (b)	-66,62	539	-2,9E-07		422,5
Prove a 3 schiume					
I+II+III	125,05	499	1,52E-07	0,159	388,4
III+II+I	85,31	513,23	2,14E-07	0,198	427,5
II+I+III	119,61	466,66	1,53E-07	0,152	388,7
III+I+II	147,10	489,29	1,24E-07	0,144	407,6
Media	54,91	495,51	1,18E-07	0,217	392,4
Variazione	113,31%	6,51%	330,79%	32,27%	6,44%

Naturalmente per i valori negativi di k non è possibile calcolare il relativo f , ma a parte questa precisazione, si può notare lo stesso comportamento evidenziato durante lo studio delle schiume in alluminio. Nella fattispecie, si nota, anche ad occhio, una grande dispersione del parametro a , accompagnata da una minor dispersione del parametro b e del relativo parametro C .

Se si confrontano i dati presenti con le tabb. 4.16 & 4.17 ad esempio, si potrà evincere come la tendenza sia la medesima, con una forte variazione in corrispondenza dei parametri più dispersi, come d'altronde è normale che avvenga, ed una molto più ridotta variazione in corrispondenza del parametro C , il quale, in questo caso, per le schiume NCX1116 oscilla in un *range* compreso **fra 360 e 420**, con un valor medio univoco di C intorno a 390, bene in linea con quanto riferito da altri autori nella letteratura scientifica disponibile.

Alcuni autori, come *Khayargoli et al.*¹⁵ citano di aver ricavato, per questo tipo di schiume, un C pari a **370**. Altri autori ancora, come *Bonnet et al.*¹⁶ ricavano un C pari a **381**. In questo caso, la corrispondenza fra i valori calcolati dei due coefficienti è ancora più evidente, giungendo ad una corrispondenza quasi esatta.

In questo caso, a differenza di quanto constatato con le schiume in lega di alluminio, vi è stata minor difficoltà nel reperire raffronti all'interno della letteratura scientifica, poiché questo particolare tipo di materiale viene codificato seguendo una sigla che lo categorizza sia in base al materiale, sia in base al numero di PPI, ciò ha permesso un confronto molto più accurato fra risultati di altri autori e risultati autonomamente ottenuti.

Tabella 4.20: Rassegna dei risultati di C in letteratura, confrontati con i risultati ottenuti.

Autore	C [m⁻¹]
<i>Khayargoli et al.</i>	370
<i>Bonnet et al.</i>	381
Risultato di riferimento	390 <i>range: 360÷420</i>

4.4 Ridiscussione dell'approccio al modello teorico

Dai risultati mostrati precedentemente in questo capitolo, si evince in maniera chiara come la rappresentazione del comportamento fluidodinamico delle schiume metalliche, oggetto di questo caso studio, tramite i parametri fluidodinamici k , f e C soffra di numerose lacune, di fronte alle quali l'unica plausibile risposta risiede nella correzione di questo modello teorico, evidenziandone le mancanze ed adattandolo al caso studio in questione, per meglio descrivere la realtà oggettiva verificata in fase di sperimentazione.

4.4.1 Precisazioni sul modello di Darcy-Forchheimer

È necessario specificare sin da subito che non è l'obiettivo di questo capitolo ridiscutere la teoria su cui si basa lo studio della fluidodinamica trattata nel caso studio, bensì di analizzare quanto appreso dalla sperimentazione e metterlo in relazione al modello teorico utilizzato, ovvero il modello di *Darcy-Forchheimer* per il moto di un fluido in un mezzo poroso.

¹⁵ Khayargoli P., Loya V., Lefebvre L.P., Medraj M., "The impact of microstructure on the permeability of metal foams", CSME 2004 Forum, Ontario, London, pp. 220-228, (2004)

¹⁶ Bonnet J.P., Topin F., Tadrist L., "Flow laws in metal foams: compressibility and pore size effects", Transport in Porous Media, Vol.73, pp. 233-254, (2008)

Occorre anzitutto ricordare la descrizione del modello, proposta tramite l'eq. 2.9, che qui viene riproposta:

$$-\frac{dp}{dz} = \frac{\mu}{k} \cdot u + \frac{f \cdot \rho}{\sqrt{k}} \cdot u^2 \quad (2.9)$$

Come è già stato specificato, dalla linearizzazione di questa equazione rispetto alla velocità si può trarre l'equazione di una retta, con coefficienti a e b . Da tali coefficienti si ricavano poi le sopracitate variabili fluidodinamiche, come ribadito dall'eq. 4.1, qui riproposta

$$-\frac{dp}{dz} \cdot \frac{1}{u} = \frac{\mu}{k} + \frac{f \cdot \rho}{\sqrt{k}} \cdot u = a + b \cdot u \quad (4.1)$$

Dai risultati ottenuti, con particolare riferimento al presente capitolo, sez. 4.3.4, viene dimostrato come l'estrapolazione di qualsivoglia variabile, sia essa k oppure f , dal parametro a , porti inevitabilmente all'errore, data la sensibilità con la quale il valore dell'intercetta della retta varia a fronte delle modeste oscillazioni dei dati di perdita di carico.

Il mantenimento del regime di Darcy per un fluido che scorre all'interno di un mezzo poroso è intimamente legato al numero di Reynolds, il superamento di un certo livello di turbolenza causa infallibilmente la transizione da questo regime a quello di Forchheimer. Il raggiungimento, ed il mantenimento, di velocità molto basse, utilizzando aria come fluido termovettore, è estremamente difficile, con le conseguenze descritte nel paragrafo precedente.

Il motivo per il quale ciò avviene è da ricercarsi in primo luogo dalla contraddizione sussistente nel ricercare l'estrapolazione di un parametro proprio del regime di Darcy, quale è la permeabilità, mentre si opera nel regime di Forchheimer, come dimostrano ampiamente i grafici riportati in figg. 4.24 & 4.25.

La sconnessione fra il parametro calcolato, ovvero k , e il regime di moto associatovi, causa l'irragionevole discrepanza fra i risultati riscontrata in precedenza, basata quasi unicamente sull'inconsistenza del valore ricavato di permeabilità, quasi certamente non corretto e quindi non utilizzabile per la caratterizzazione di questi materiali porosi.

È stato altresì suggerito, unicamente in relazione a quest'istanza, ovvero la ricerca di un modello che sapesse meglio descrivere il comportamento fisico delle schiume metalliche, di non considerare ulteriormente la componente relativa al regime di Darcy, concentrandosi solo sul termine di Forchheimer. Tuttavia, è doveroso precisare che qualsiasi sviluppo che proseguisse lungo questa linea di pensiero dovrebbe essere abbandonato celermente, poiché, come è facile intuire, la

cancellazione di un termine da un'equazione porta con sé una certa dose di errore, più o meno rilevante a seconda del peso di questo termine all'interno della relazione.

In questo caso, il calcolo del peso del termine di Darcy porta a risultati inconcludenti, in quanto, sebbene appaia evidente come esso sia indubitabilmente il termine minoritario all'interno dell'equazione 2.9, il suo peso dipende in maniera critica dal parametro k , il quale, come è stato ampiamente dimostrato, soffre di un'incertezza che ne pregiudica qualsiasi utilizzo come parametro di confronto, e per estensione, anche i parametri da esso derivanti, anche se in misura minore.

Capitolo V: Conclusioni

5.1 Conclusioni sul modello teorico

Il modello teorico scelto per descrivere il comportamento delle schiume metalliche, in quanto mezzi porosi, è stato comprovato essere corretto; sia dalla misurazione delle perdite di carico e del loro gradiente lineare, entrambi rappresentati rispetto alla velocità del fluido, ove il modello descritto dal regime di Darcy-Forchheimer bene esprimeva il reale comportamento delle schiume metalliche, rilevato durante la sperimentazione, sia dall'elaborazione di un grafico adimensionale in cui posizionare le prove sperimentali effettuate, utilizzando parametri largamente impiegati nella letteratura scientifica concernente l'argomento "schiume metalliche".

La conclusione alla quale si è addivenuti è che, per il *range* di velocità dell'aria utilizzato, e per la natura delle schiume metalliche testate, il regime di moto nel quale si è ricaduti è in larga parte quello di Forchheimer, lambendo solo occasionalmente ed in maniera marginale il regime di transizione fra Darcy e Forchheimer, ciò si evince chiaramente dalle figg. 4.24 & 4.25

5.2 Conclusioni sui risultati sperimentali

Buona parte della trattazione inscritta nel Capitolo IV ha riguardato il problema dell'utilizzo della permeabilità k come parametro descrittivo delle schiume metalliche, in particolar modo delle schiume ad alta porosità, oggetto della trattazione presente.

Tale parametro si è dimostrato essere inadatto alla caratterizzazione di questi materiali porosi. Il motivo principale è constatato nell'impossibilità di definire un unico valore di k per data prova sperimentale, come ha dimostrato l'analisi sull'oscillazione del valore di a , nel Capitolo IV, sezione 3.4, tramite una semplice variazione della pendenza della retta $y = a + b \cdot u$ entro il cono d'errore del $(dp/dz)(1/u)$.

Questa impossibilità nel definire un k univoco risiede nell'altresì infausta impossibilità di ricadere nel regime di moto di Darcy, a Re_k molto inferiori a 1, ben al di sotto del regime al quale sono state effettuate le prove sperimentali oggetto di esposizione, per le quali il *range* di Re_k oscilla fra 40 e 10000, pienamente nella zona di Forchheimer.

L'impossibilità di effettuare misurazioni a Re_k abbastanza bassi da consentire di arrivare al regime di Darcy, nella parte sinistra del grafico 4.24, ricade quasi unicamente sulla natura del fluido utilizzato per l'esperienza sperimentale, ovvero

l'aria. L'apparato sperimentale costruito a priori non avrebbe permesso in ogni caso di raggiungere le velocità necessarie a mantenere la turbolenza al di sotto del limite richiesto per mantenere il regime di Darcy, considerando inoltre le numerose accidentalità presenti sul percorso del canale aeraulico tale risultato sarebbe diventato semplicemente impossibile, ed i dati estrapolati da tale misurazioni fallati da un'incertezza oggettivamente troppo ampia.

Sarebbe però possibile eseguire misurazioni a numeri di Reynolds sufficientemente piccoli se, ad esempio, si cambiasse il fluido da aria ad acqua, sostituendo al contempo il mezzo di sospingimento, ottenendo un vantaggio sia in termini di viscosità dinamica che di velocità raggiungibili uniformemente all'interno del canale.

5.3 Conclusioni sulle schiume metalliche

5.3.1 Perdite di carico

Da un punto di vista industriale, riferendosi unicamente alle perdite di carico, è stato provato come le schiume metalliche presentino prestazioni simili alle comuni batterie alettate, oggi diffuse all'interno di impianti di condizionamento a ventilconvettori, pompe di calore e chiller.

Il ventilconvettore utilizzato durante le prove sperimentali, prodotto dall'azienda Galletti S.p.a, monta una batteria alettata in alluminio spessa 80mm, quindi la sua diretta comparazione è rappresentata da una schiuma metallica dello stesso spessore.

Da come si è potuto dedurre dall'analisi sulle curve del ventilatore nel capitolo IV, sezione 3.1, sottosezione 2, i dati relativi alle schiume di 8cm presentano una curva di perdite di carico molto simile alla curva relativa alla batteria alettata, fornendo quindi la possibilità di intercambiare fra i due scambiatori senza dover subire, in retrospettiva, un eccessivo rincaro di energia spesa per convezione forzata dell'aria nei canali, né, conseguentemente, dover temere un incremento di rumorosità, in quanto le perdite di carico, a parità di portata, risultano le stesse.

5.3.2 Scambio termico

Dal punto di vista dello scambio termico non è stato realizzato nulla di conclusivo nella redazione della presente trattazione, sebbene lo studio di entrambi i parametri sia stato condotto quasi parallelamente, riconoscendo l'importanza critica dell'efficienza di scambio termico per il successo di questo sistema innovativo di scambio termico.

A fronte di quanto detto, le schiume metalliche mantengono le proprietà termiche del materiale del quale sono costituite, ovvero metallo, quindi altamente

termicamente conduttivo, massimizzando al contempo l'area esposta al fluido da trattare.

Si può però dire che il parametro critico per l'efficienza di scambio termico risiede nel garantire un'area di contatto termico sufficientemente grande fra i tubi da cui prelevare calore e la schiuma metallica, la quale, per la sua peculiare morfologia piena di cavità e di filamenti metallici, rischia di non ottemperare a quest'ultima necessità.

La soluzione a questo tipo di problema potrebbe consistere nel rivestire i tubi in cui scorre il fluido caldo con pasta termoconduttiva adatta allo scopo, in quantità non eccessiva, tale da non occludere i pori della schiuma. In tal modo si migliora notevolmente il contatto termico fra schiuma e tubo, ottenendo un incremento di efficienza energetica.

5.4 Sviluppi futuri

In futuro sarà sicuramente necessario studiare estesamente l'efficienza di scambio termico e le tecniche di ottimizzazione di tale parametro, indubabilmente di fondamentale importanza per l'ipotetico futuro impiego di tale tecnologia nel panorama industriale di largo consumo.

È inoltre vitale comprendere se la fabbricazione su larga scala di tali schiume possa, a fronte delle meccaniche costo-ottimizzatrici dell'economia di scala, subire una significativa riduzione del prezzo di fabbricazione, ad oggi eccessivamente alto per una penetrazione di mercato paragonabile a quella dei ventilconvettori "classici". Ciò dipende in larga parte dal metodo di fabbricazione delle schiume per *elettrodeposizione* di polveri metalliche.

Se la ricerca dimostrasse indubabilmente la vantaggiosità energetica di tali apparati rispetto alle loro controparti oggi impiegate, il passo successivo consterebbe nell'invenzione di un nuovo metodo di fabbricazione, con lo stesso grado di affidabilità e replicabilità del risultato, ma meno costoso. Unendo a tale innovativa ed ipotetica metodologia di costruzione i fattori di risparmio sopraelencati si addiverrebbe ad uno scenario realmente favorevole per l'avvento di questa nuova tecnologia nello scenario quotidiano.

Bibliografia

Bağcı Ö., Dukhan N., “*Experimental hydrodynamics of high-porosity metal foam: Effect of pore density*”, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 103, pp. 879-885, (2016)

Baril E., Mostafid A., Lefebvre L.P., Medraj M., “*Experimental demonstration of the entrance/exit effects on the permeability measurements of porous materials*” - Advanced Engineering Materials, Advanced Engineering Materials, Vo. 10, (2008)

Barletta A., “*Flow in Porous Media: An Introductory Survey*”, 14th UIT Summer School

Bhattacharya A., Calmidi V.V., Mahajan R.L., “*Thermophysical properties of high porosity metal foams*”, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 45, pp. 1017-1031, (2002)

Bonnet J.P., Topin F., Tradist L., “*Flow laws in metal foams: compressibility and pore size effects*”, Transport in Porous Media, Vol. 73, Issue: 2, pp. 233–254, (2007)

Boomsma K., Poulidakos D., “*The effects of compression and pore size variations on the liquid flow characteristics in metal foams*”, Journal of Fluids Engineering, Vol. 124, Issue: 1, pp. 263-272, (2001)

Buonomo B., di Pasqua A., Ercole D., Manca O., “*The effect of PPI on thermal parameters in compact heat exchangers with aluminum foam*”, UIT Heat Transfer Conference, (2018)

Chen B., Liu P., Chen J.H., “*Influence of processing on surface morphology and specific surface area for the nickel foam made by electrodeposition*”, Multidiscipline Modeling in Materials and Structures, Vol. 14, Issue: 4, pp. 735-743, (2018)

De Carvalho T.P., Morvan H.P., Hargreaves D.M., Oun H, Kennedy A., “*Pore-scale numerical investigation of pressure drop behaviour across open-cell metal foams*”, Transport in Porous Media, Vol. 117, Issue: 2, pp. 311–336, (2017)

De Schampheleire S., De Kerpel K., Ameer B., De Jaeger P., Bağcı Ö., De Paepe M., “*A discussion on the interpretation of the Darcy equation in case of open-cell metal foam based on numerical simulations*”, Materials (Basel, Switzerland), Vol. 9, Issue: 6, 409, (2016)

Dukhan N., Patel K.P., “*Entrance and Exit Effects for Fluid Flow in Metal Foam*”, American Institute of Physics Conference Proceedings, 1254, pp. 299-304, (2010)

- Kamath P.M., Balaji C., Venkateshan S.P., “*Convection heat transfer from aluminium and copper foams in a vertical channel – An experimental study*”, International Journal of Thermal Sciences, Vol. 64, pp. 1–10, (2014)
- Khayargoli P., Loya V., Lefebvre L.P., Medraj M., “*The impact of microstructure on the permeability of metal foams*”, CSME 2004 Forum, Ontario, London, pp. 220-228, (2004)
- Kim D.Y., Kim K.C., “*An experimental study on the thermal and hydraulic characteristics of open-cell nickel and copper foams for compact heat exchangers*”, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 130 pp. 162–174, (2019)
- Kotresha B., Gnanasekaran N., “*Effect of thickness and thermal conductivity of metal foams filled in a vertical channel – A numerical study*”, International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow, (2018)
- Kumar P., Topin F., “*State-of-the-Art of Pressure Drop in Open-Cell Porous Foams: Review of Experiments and Correlations*”, Journal of Fluids Engineering, Vol. 139. 111401-13, (2017)
- Mancin S., Zilio C., Cavallini A., Rossetto L., “*Heat transfer during air flow in aluminum foams*”, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 53, pp. 4976–4984, (2010)
- Mancin S., Zilio C., Cavallini A., Rossetto L., “*Pressure drop during air flow in aluminum foams*”, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 53, pp. 3121–3130, (2010)
- Mancin S., Zilio C., Diani A., Rossetto L., “*Air forced convection through metal foams: Experimental results and modeling*”, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 62, pp.112–123, (2013)
- Medraj M., Baril E., Loya V., Lefebvre L.P., “*The effect of microstructure on the permeability of metallic foams*”, Journal of Materials Science, Vol. 42, Issue: 12, pp 4372–4383, (2007)
- Mostafid A.M., *Entrance and exit effects on flow through metallic foams*”, PhD Thesis, Concordia University, Montreal, (2007)
- Oun H., Kennedy A., “*Experimental investigation of pressure-drop characteristics across multi-layer porous metal structures*”, Journal of Porous Materials, Vol. 21, pp. 1133-1141, (2014)

Tadrist L., Miscevic M. et al., “*About the use of fibrous materials in compact heat exchangers*”, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 28, Issues: 2–3, pp. 193-199, (2004)

Ringraziamenti

Vorrei ringraziare molte persone per il completamento di questo percorso di studio e per la stesura di questo elaborato di tesi che ne è la prova, molte più, purtroppo, di quante queste striminzite righe potrebbero contenere.

In primis sicuramente voglio ringraziare il mio Relatore, il Professor Gian Luca Morini, e il mio Correlatore, l'Ingegnere Stefano Cancellara, così come gli Assegnisti di Ricerca e il personale del Laboratorio di via Terracini, i quali mi hanno seguito e suggerito la strada e fornito supporto e comprensione in più di un'occasione, meritando quindi la mia eterna gratitudine.

In secundis vorrei ringraziare gli amici, i parenti, i colleghi e i compagni di studio che, durante gli anni trascorsi sui banchi e in viaggio fra casa e Bologna, non hanno mai mancato di fornire un aiuto, un supporto quando ve ne fosse la necessità, e senza i quali non sarei giunto al compimento di questo percorso.

Infine, ma non per importanza, vorrei ringraziare i miei genitori, per l'infinita pazienza, comprensione, supporto e generosità che mi hanno dimostrato in questi anni, e la mia ragazza Laura, che è sempre stata al mio fianco durante questi anni e che spero lo sarà ancora a lungo.

Nicola Chiarotti

Bologna, 15 Marzo 2019