

POLITECNICO DI MILANO
Facoltà di Ingegneria Industriale
Corso di laurea Magistrale in Ingegneria Aeronautica



Studio sperimentale della scia di un corpo tozzo in presenza
di inserti di materiale poroso

Relatore: Prof. Maurizio QUADRID
Correlatore: Prof. Luca CORTELEZZI

Tesi di Laurea di:
Luca GRIZZETTI
Matr. 765154

Anno Accademico 2015 - 2016

Abstract

The flow around a bluff body, a D-shape model with inserts of porous material is experimentally studied. The chosen porous material is preliminarily qualified by an experimental test, to obtain the numerical values of porosity and permeability. The analysis is performed by an hot wire probe placed in the wake of the body at $Re = 36000$. The data have been analyzed by computing the first 4 statistical moments, the autocorrelation and the spectrum of the signal. Our results support the idea that the inserts of porous material help reducing the wake thickness and regularizing the turbulent structures.

Key Words

Darcy - Permeability - Porosity - Hot Wire - D-Shape

Sommario

È stato studiato sperimentalmente il flusso attorno ad un corpo tozzo, un modello di D-shape con degli inserti di materiale poroso. Il materiale poroso scelto è stato preliminarmente qualificato da un prova empirica, per ottenere i valori numerici della porosità e della permeabilità. L'analisi è stata effettuata tramite una sonda a filo caldo posta in scia al corpo a $Re = 36000$. I dati sono stati analizzati calcolando i primi 4 momenti statistici, l'autocorrelazione e lo spettro del segnale. I nostri risultati supportano l'idea che gli inserti di materiale poroso contribuiscano alla riduzione della scia e alla regolarizzazione delle strutture turbolente.

Parole chiave

Darcy - Permeabilità - Porosità - Filo caldo - D-Shape

Contents

Abstract	ii
Contents	iv
List of Figures	vii
List of Tables	ix
1 Introduzione	1
2 Materiali Porosi	5
2.0.1 Porosità	5
2.0.2 Permeabilità	6
2.1 Legge di Darcy	7
2.2 Corrente di Forchheimer e equazione di Ergun	9
2.3 Transizione dal regime laminare a quello turbolento	10
2.4 Moto di un fluido attraverso un mezzo poroso	10
2.5 Equazioni di Navier-Stokes mediate sul volume (VANS)	11
3 Air Por	15
3.1 Il materiale	15
3.1.1 Qualifica del materiale	16
4 Set-up sperimentale	21
4.1 Modello	21
4.2 Galleria del Vento	22
4.3 Anemometro a filo caldo	25
4.4 Processo di acquisizione dati	26
5 Analisi risultati	29
5.1 Momenti statistici	29
5.1.1 Media	29
5.1.2 Varianza	31
5.1.3 Intensità turbolenta	32
5.1.4 Skewness	33
5.1.5 Kurtosis	34
5.2 Correlazione	37
5.3 Spettro	45

6 Conclusioni e sviluppi futuri	53
--	-----------

Bibliography	55
---------------------	-----------

List of Figures

2.1	Flusso attraverso una struttura porosa	5
2.2	Apparato sperimentale Darcy [1]	7
2.3	Risultati degli esperimenti di Darcy; la linea solida è la regressione lineare dei dati	8
2.4	Scale presenti in un corpo di materiale poroso [2]	11
2.5	Andamento di una grandezza mediata $\langle \psi \rangle$ all'aumentare del volume [3]	12
3.1	Grafico Δp portata	18
3.2	Confronto tra la curva sperimentale e teorica della velocità del fluido attraverso il materiale poroso e il ΔP applicato	20
4.1	Modelli CAD delle due configurazioni	21
4.2	Schema della galleria del vento EA103 DeltaLab	23
4.3	Curva di taratura della galleria del vento	24
4.4	Sonda anemometro a filo caldo	25
4.5	Schema 2D della sezione del modello	27
5.1	Media	31
5.2	Varianza	32
5.3	Intensità turbolenta	33
5.4	Skewness	34
5.5	Kurtosis	35
5.6	Iistogrammi $h = 26$ mm	36
5.7	Iistogrammi $h = 50$ mm	36
5.8	Iistogrammi $h = 72$ mm	37
5.9	Correlazione $h=0\text{mm} - 1\text{sec}$	38
5.10	Correlazione $h=0\text{mm} - 0.1\text{sec}$	38
5.11	Correlazione $h=4\text{mm} - 1\text{sec}$	39
5.12	Correlazione $h=4\text{mm} - 0.1\text{sec}$	39
5.13	Correlazione $h=12\text{mm} - 1\text{sec}$	39
5.14	Correlazione $h=12\text{mm} - 0.1\text{sec}$	40
5.15	Correlazione $h=18\text{mm} - 1\text{sec}$	40
5.16	Correlazione $h=18\text{mm} - 0.1\text{sec}$	40
5.17	Correlazione $h=30\text{mm} - 1\text{sec}$	41
5.18	Correlazione $h=30\text{mm} - 0.1\text{sec}$	41
5.19	Correlazione $h=40\text{mm} - 1\text{sec}$	41
5.20	Correlazione $h=40\text{mm} - 0.1\text{sec}$	42
5.21	Correlazione $h=52\text{mm} - 1\text{sec}$	42

5.22 Correlazione h=50mm - 0.1sec	42
5.23 Correlazione h=60mm - 1sec	43
5.24 Correlazione h=60mm - 0.1sec	43
5.25 Correlazione h=10mm - 1sec	43
5.26 Correlazione h=70mm - 0.1sec	44
5.27 Spettro h=0mm - 0.5 D	45
5.28 spettro 0	47
5.29 spettro 4	47
5.30 spettro 10	47
5.31 spettro 30	48
5.32 spettro 60	48
5.33 Contour spettro 0.5 D	49
5.34 Contour spettro 2 D	50
5.35 Contour spettro 3 D	51

List of Tables

2.1	Valori tipici permeabilità [4]	9
3.1	Caratteristiche materiale poroso	16
3.2	Valori medi e deviazioni standard delle varie misure per ogni quota del pelo libero per il provino ruvido	17
3.3	Valori medi e deviazioni standard delle varie misure per ogni quota del pelo libero per il provino liscio	17
3.4	Caratteristiche provino ruvido	18
3.5	Caratteristiche provino ruvido	19
4.1	Caratteristiche Galleria del Vento	23
4.2	Valori pressione utilizzati per la taratura della galleria del vento	24
5.1	Velocità esterne	30
5.2	Stima frequenza di shedding	46
5.3	Confronto frequenza misurata e stimata	46

Chapter 1

Introduzione

Sin dall'esperimento di Reynolds (1883) sul Pipe Flow [5] la turbolenza ha ricoperto un ruolo sempre più importante nell'ambito della fluidodinamica e da allora è costante materia di studio e ricerca. In particolare dal punto di vista ingegneristico il flow control è una delle sfide attuali e principali.

I motivi per controllare una corrente fluida sono molteplici. Un obiettivo può essere quello di aumentare le prestazioni riducendo la resistenza dovuta all'interazione tra corpo e il fluido, un altro è quello di migliorare processi fisici come ad esempio lo scambio di calore o di miscelazione.

Alcune tecniche, per la riduzione della resistenza aerodinamica, sono ad esempio le riblets [6], già utilizzate sugli scafi delle imbarcazioni da regata, o le tecniche di blowing e suction [7] usate sui profili alari, per rienergizzare lo strato limite e ritardarne la separazione, un altro esempio sono le reti e gli schermi di materiale a nido d'ape presenti nelle gallerie del vento per rendere uniforme la vena fluida e migliorare le condizioni di prova. Tutti questi obiettivi possono essere perseguiti seguendo due filosofie di controllo, sia in modo attivo che in modo passivo.

Nel primo metodo, si comandano, tramite una legge di controllo, degli attuatori che cercano di portare e mantenere il flusso nella condizione desiderata, nel secondo metodo a differenza del precedente non sono necessari degli attuatori, ma l'azione si basa su dei materiali o degli assetti determinati durante la fase di progettazione per mantenere il flusso nella condizione desiderata. In quest'ultimo caso la mancanza di un controllo attivo non richiede un fonte di energia per il funzionamento, rendendo quindi più semplice la realizzazione dal punto di vista impiantistico; è altresì vero che un controllo passivo è efficace solamente nella regione di progetto e non è possibile intervenire in condizioni al di fuori di essa, che in casi limite potrebbero addirittura provocare effetti indesiderati. Per avere una azione più completa ed efficacie è sempre possibile, utilizzare in parallelo i due metodi, aumentando così la bontà del controllo.

L'obiettivo di questa tesi si inserisce in questo scenario. In particolare si è scelto di dedicarsi alle tecniche passive, e nello specifico all'utilizzo di materiali porosi.

Diversi sono gli ambiti in cui la porosità è utilizzata di proposito o dalla quale non si può prescindere: tra questi si ricordano i flussi sotterranei, i fondali marini e i letti dei fiumi tra i fenomeni naturali; l'estrazione petroliera, il filtraggio e gli scambiatori di calore tra gli utilizzi artificiali.

La nostra analisi, basata su una serie di prove in galleria del vento vuole determinare o almeno aumentare la nostra conoscenza su cosa può apportare un inserto di un materiale poroso in un corpo tozzo immerso in un fluido in movimento, individuando come si modifica il campo di moto intorno ad un corpo in presenza di questi materiali.

Per fare ciò si è deciso di creare un modello di un corpo tozzo, D-Shape, su cui è possibile montare degli inserti di materiali porosi, con il quale sono state svolte delle prove in galleria del vento. Le misurazioni effettuate sono state ottenute con una sonda a filo caldo posta in coda al modello per visualizzare il contenuto in frequenza della scia e osservare se l'inserto di un materiale poroso potesse cambiare la dimensione della scia e le caratteristiche turbolente presenti in essa rispetto ad un modello di riferimento, realizzato senza un materiale poroso.

Oltre ad osservare l'effetto sul flusso si confronteranno i dati ottenuti sperimentalmente con quelli numerici contenuti in diversi articoli.

Struttura della tesi

Questa tesi si sviluppa nel seguente modo. Il capitolo 2 presenta una descrizione fisica e geometrica dei materiali porosi, si introducono le 2 grandezze fondamentali per questo tipo di materiale, la porosità e la permeabilità, introducendo ed analizzando la legge di Darcy, e le relative correzioni. Per capire meglio queste nuove grandezze vengono presentate brevemente le equazioni di N-S mediate sul volume utilizzate in letteratura per lo studio dei materiali porosi.

Nel capitolo 3 viene presentato il materiale scelto per le prove, AirPor prodotto da Air Por S.a.s. del Dott. Stefano Goglio. Dopo una prima descrizione delle caratteristiche fornite dal produttore vengono esposti i risultati delle prove effettuate per la caratterizzazione della permeabilità del materiale, unica grandezza relativa al materiale non nota al produttore e le particolarità di Airpor. Il quarto capitolo è dedicato alla presentazione del set up sperimentale. Viene descritto il modello la sua geometria ed il posizionamento all'interno della camera di prova della galleria. Una sezione è relativa alla galleria del vento e alla sua taratura. Un'altra parte contiene i trasduttori e le sonde utilizzate. L'ultima sezione è riservata al procedimento di acquisizione dati. Nel quinto capitolo

vengono illustrati e analizzati i risultati ottenuti dall'analisi dei dati raccolti, con i riferimenti ad eventuali riscontri con dati presenti in letteratura.

Nell'ultimo capitolo vengono infine tratte alcune le conclusione e ipotizzati i possibili passi futuri per proseguire e migliorare lo studio.

Chapter 2

Materiali Porosi

In questo capitolo verranno presentati i materiali porosi, con le loro caratteristiche principali sia geometriche che fisiche. Verrà introdotta la legge di Darcy che è la relazione fondamentale su cui si basa la caratterizzazione di questi materiali e le correzioni per la parte non lineare. Infine, non necessario ai fini pratici di questo studio, ma utile per comprendere meglio il fenomeno di un flusso attraverso un materiale poroso, verranno esposte le equazioni di moto scritte con il modello VANS.

2.0.1 Porosità

Osservando un materiale poroso sotto una lente di ingrandimento si può notare, come si vede in figura 2.1, che questo è caratterizzato da una distribuzione non costante ed uniforme del materiale al suo interno, si alternano, infatti, volumi occupati da materiale solido e volumi vuoti che vengono riempiti dal fluido in cui il corpo è immerso al momento dell'osservazione o da quello che era presente al momento della fabbricazione del materiale stesso.

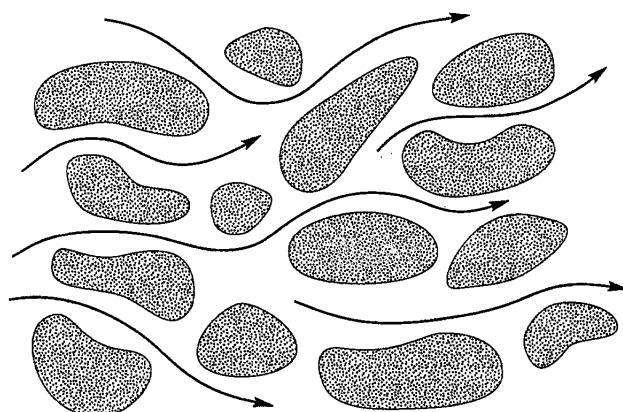


FIGURE 2.1: Flusso attraverso una struttura porosa

Questa caratteristica, che può essere vista anche come la capacità del materiale di immagazzinare un fluido all'interno del corpo stesso, è la *porosità*, unica vera proprietà geometrica fondamentale per qualificare questo tipo di materiale. Questa grandezza è condensata in un indicatore numerico adimensionale ε , che non da nessuna informazione sulla struttura interna. Ovviamente per quanto appena detto la porosità è una grandezza media all'interno di un volume di controllo ed è definita come:

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

dove V_f e V sono rispettivamente il volume occupato dal fluido ed il volume preso in considerazione. La porosità, per come è definita è una funzione del solo volume di riferimento V , $\varepsilon = \varepsilon(V)$ e può quindi variare da 0 quando il volume è tutto occupato da materiale solido a 1 quando tutto è occupato dal fluido.

2.0.2 Permeabilità

La permeabilità invece è la principale proprietà fisica e descrive con quanta facilità un fluido si muove attraverso un corpo realizzato con un materiale poroso. Questa dipende da molti fattori; in primis se le celle, ovvero i singoli volumi vuoti presenti nel materiale, sono chiuse o aperte, e quindi in collegamento con le celle adiacenti, permettendo in questo modo il passaggio del fluido tra di esse; in secondo luogo hanno una grande influenza la forma, la dimensione e l'orientazione delle celle e loro rifinitura superficiale, che andando a definire le perdite di carico modificano la portata attraverso il materiale sottoposto ad una differenza di pressione alle sue estremità. Infine grande importanza ricopre chiaramente il materiale di cui è fatto il corpo, se questo è impermeabile o meno e anche le sue caratteristiche chimiche che ne modificano il comportamento a seconda del fluido con cui è a contatto.

Visti i diversi aspetti e le loro numerose combinazioni che entrano in gioco per definire la permeabilità, è praticamente impossibile usare un approccio parametrico per la sua determinazione; è comodo invece usare un approccio empirico, i cui risultati tengono conto di tutte le variabili in gioco, come proposto da Darcy [1]. Nella figura 2.2 è mostrata una rappresentazione dell'apparato sperimentale utilizzato da Darcy per il suo studio. Lo strumento utilizzato è un cilindro dentro il quale è posto il provino del materiale poroso, del quale si vuole calcolare la permeabilità. Il contenitore permette di imporre una portata entrante nella parte superiore ed ha un rubinetto, al di sotto del provino, per l'uscita del fluido. A cavallo del provino è possibile, tramite un manometro differenziale, misurare il ΔP applicato sul materiale.

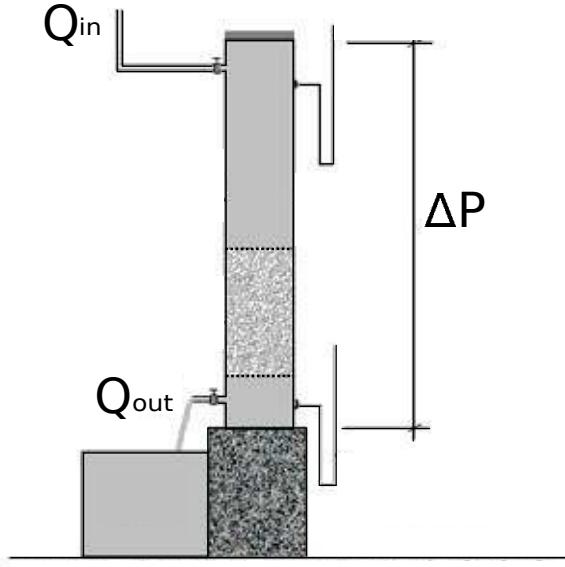


FIGURE 2.2: Apparato sperimentale Darcy [1]

Con questo approccio empirico si riducono le numerose variabili da tenere in considerazione, come visto in precedenza, alle sole ΔP , applicato all'estremità del provino in materiale poroso e Q , flusso netto che passa attraverso il materiale.

2.1 Legge di Darcy

L'equazione che descrive il moto di un fluido attraverso un mezzo poroso da Darcy (1856) [1], la quale descrive il comportamento cinetico medio del fluido in funzione della differenza di pressione tra i due estremi del corpo e della permeabilità del mezzo.

Dai suoi esperimenti Darcy produsse la relazione (2.2)

$$Q = -kA \frac{p_2 - p_1}{\rho g L} \quad (2.2)$$

Dove Q è la portata volumetrica espressa in $\frac{m^3}{s}$, $p_2 - p_1$ è la differenza di pressione in Pa , L lo spessore del materiale poroso in m , A l'area attraverso cui si ha la portata in m^2 , g l'accelerazione di gravità in $[m/s^2]$ e ρ la densità del fluido espressa in $[kg/m^3]$, mentre k è la conduttività idraulica.

La conduttività idraulica è una caratteristica del fluido definita come

$$k = \frac{gK}{\nu} \quad (2.3)$$

dove viene introdotto il coefficiente di permeabilità K espressa in m^2 , avendo introdotto la viscosità cinematica ν . Con l'introduzione di questa definizione la relazione (2.2) si può scrivere nella forma

$$Q = \frac{KA}{\mu} \frac{\Delta P}{L} \quad (2.4)$$

Si nota dalla (2.4) un legame lineare tra la portata ed il gradiente di pressione, ovvero la permeabilità K è una costante.

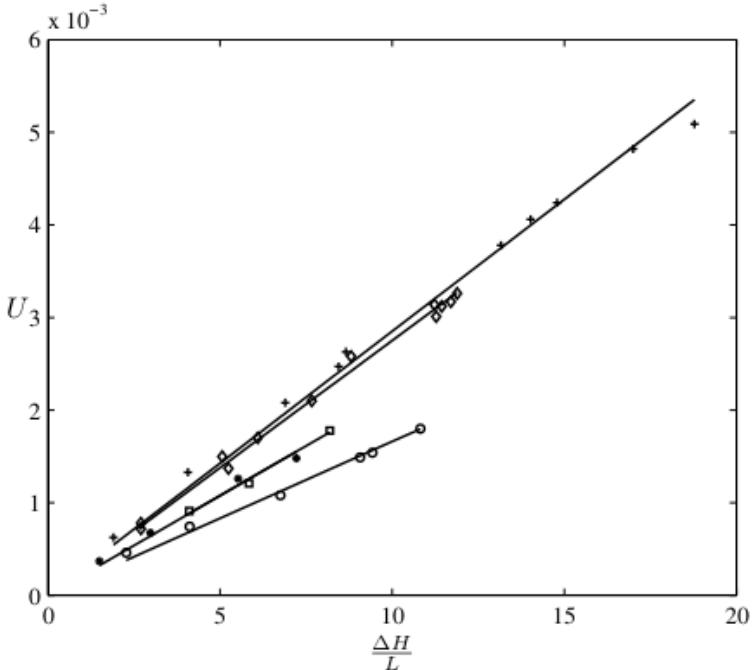


FIGURE 2.3: Risultati degli esperimenti di Darcy; la linea solida è la regressione lineare dei dati

Nella figura 2.3 è mostrata proprio questa linearità considerando la velocità media definita come $U = \frac{Q}{A}$ e il gradiente di pressione, espresso come pressione idrostatica, sullo spessore dello strato poroso. Si intuisce quindi che per un materiale con una permeabilità maggiore basterà applicare un gradiente di pressione minore per ottenere la stessa portata volumetrica attraverso di esso rispetto ad uno con una permeabilità minore. Nella tabella 2.1 sono elencati alcuni valori di permeabilità all'acqua di materiali comuni. Si costata che K può variare da 0 per un materiale impermeabile, che non lascia quindi fluire una portata nulla attraverso di esso, ad infinito per un materiale che non oppone resistenza, $K \in [0, \infty)$.

TABLE 2.1: Valori tipici permeabilità [4]

Materiale	$-log_{10}K$
Ghiaia pulita	7 ÷ 9
Sabbia pulita	9 ÷ 12
Sabbia fine	12 ÷ 16
Torba	11 ÷ 13
Argilla	13 ÷ 15
Arenaria	14 ÷ 16
Dolomia	16 ÷ 18
Granito	18 ÷ 20

2.2 Corrente di Forchheimer e equazione di Ergun

In realtà la legge di Darcy è valida sotto la condizione che il Reynolds del flusso all'interno del materiale poroso sia inferiore a 1. Forchheimer (1901) [8] fu il primo ad accorgersi che la legge di Darcy non è universale ma al crescere del numero del Reynolds la relazione lineare tra il gradiente idraulico e la portata non è più verificata. Forchheimer propose quindi di aggiungere un termine quadratico per tenere conto degli effetti inerziali che fanno deviare i dati dal comportamento lineare proposto da Darcy tra il Δp e la portata;

$$-\nabla p = \frac{\mu}{\alpha} U + \beta \rho U^2 \quad (2.5)$$

dove β , il coefficiente di resistenza inerziale espresso in m^{-1} e α , il coefficiente di resistenza viscosa, espresso in m^2 sono da determinare e sono legati alle proprietà del materiale considerato.

Ergun, sotto l'ipotesi che il materiale poroso sia simile a un blocco contentente delle colonne di sfere o cilindri, individuò una relazione per α e β . In particolare

$$\alpha = \frac{d_p^2}{150} \frac{\varepsilon^3}{(1 - \varepsilon)^2} \quad (2.6)$$

e

$$\beta = \frac{1.75}{d_p} \frac{(1 - \varepsilon)}{\varepsilon^3} \quad (2.7)$$

dove d_p è la dimensione media delle particelle e ε è la porosità. Le due costanti 150 e 1.75 sono puramente empiriche (Levec e Nemec 2005) [9]. La relazione finale con i

termini introdotti da Ergun risulta

$$-\nabla p = \frac{150\mu(1-\varepsilon)^2 u}{d_p^2 \varepsilon^3} + 1.75 \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \frac{\rho u^2}{d_p} \quad (2.8)$$

Esistono, in realtà diverse forme dell'equazione di Ergun che differiscono tra loro per il valore delle costanti, che dipendo dalla strutture del materiale utilizzato. Nel capitolo successivo verranno presentate le costanti per il materiale preso in esame, e come queste sono state stimate.

2.3 Transizione dal regime laminare a quello turbolento

Per determinare il regime di flusso all'interno del materiale poroso, che come si è visto è il discriminante tra la legge di Darcy originale e quella corretta con l'aggiunta del termine quadrato, si definisce un *numero di Reynolds modificato*. Il termine di velocità viene sostituito dalla velocità interstiziale definita come:

$$u_i = \frac{u}{\varepsilon} \quad (2.9)$$

La lunghezza caratteristica per il mezzo poroso è definita come il volume a disposizione del fluido in moto diviso per la superficie sopra il quale il fluido deve passare.

$$L = \frac{AL\varepsilon}{AL(1-\varepsilon)s_v} = \frac{\varepsilon}{(1-\varepsilon)s_v} \quad (2.10)$$

dove s_v è la superficie specifica per unità di volume [$\frac{m^2}{m^3}$]. Usando questi nuovi elementi per definire il numero di Reynolds si ottiene:

$$Re_{mod} = \frac{\rho u}{(1-\varepsilon)s_v\mu} \quad (2.11)$$

Il valore critico del Re per cui ha inizio la transizione dal regime laminare a quello turbolento è $Re \approx 2$ [9].

2.4 Moto di un fluido attraverso un mezzo poroso

Per una visione più completa e per capire meglio come queste nuove grandezze entrano in gioco, in questa sezione si riportano le equazioni del moto per un fluido che attraversa un materiale poroso. Ai fini di questo studio, queste relazioni non sono di vitale importanza, poichè le nostre osservazioni scaturiranno da dati empirici e non da un modello numerico; ciononostante la conoscenza di queste è utile per avere una visione di insieme

più completa e per eventuali confronti con dei risultati numerici.

Le leggi che governano il moto di un fluido incomprimibile attraverso un mezzo poroso sono le classiche equazioni di Navier-Stokes incomprimibili per un fluido newtoniano e di continuità.

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u}) = \frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \mathbf{u} \quad (2.12)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (2.13)$$

dove $\mathbf{u} = [u \ v \ w]^T$ è il vettore velocità, mentre p e ν sono rispettivamente la pressione e la viscosità cinematica del fluido. Bisogna associare alle (2.12) e (2.13) le condizioni al contorno di non penetrazione e non scorrimento. Per fare ciò è necessario descrivere dettagliatamente il materiale, nel quale è presente un ampio range di scale di grandezza. Come si vede in (2.4) le scale più piccole l_f e l_s si riferiscono alla dimensione dei pori e delle "particelle" che formano il materiale stesso, mentre la scala L_p è legata alla dimensione macroscopica del corpo.

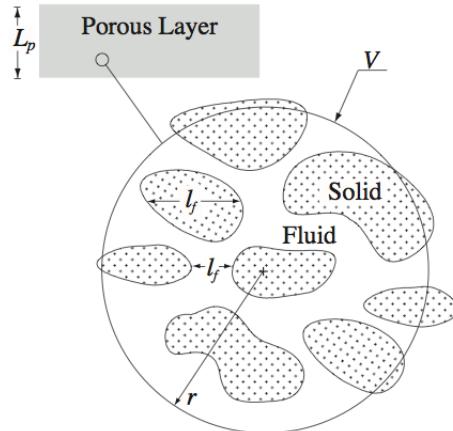


FIGURE 2.4: Scale presenti in un corpo di materiale poroso [2]

Questo approccio risulta spesso impraticabile a causa della difficoltà di descrivere con la giusta accuratezza la struttura interna del materiale, oltre al fatto che anche se ciò fosse possibile, la sua risoluzione richiederebbe un enorme potenza e tempo di calcolo.

2.5 Equazioni di Navier-Stokes mediate sul volume (VANS)

Un possibile approccio per affrontare il problema dal punto di vista numerico è il metodo delle equazioni mediate sul volume (VANS). Questo metodo semplifica il problema mediando le equazioni (2.12) e (2.13) su una sfera, di raggio $r \ll L_p$. Questa operazione è

valida se si assume soddisfatta l'ipotesi di buona separazione delle scale spaziali ovvero $l_s \sim l_f \ll r \ll L_p$ [3] [10] [2] .

In questo metodo ad ogni punto interno ad un volume V , sia che questo sia in una zona occupata dal fluido o solida, viene assegnata una velocità, od ogni altra grandezza di interesse, mediata sul proprio volume. Così facendo il mezzo poroso può essere trattato come un mezzo continuo. È importante che il volume su cui mediare sia sufficientemente grande da garantire un andamento continuo delle grandezze all'interno del materiale.

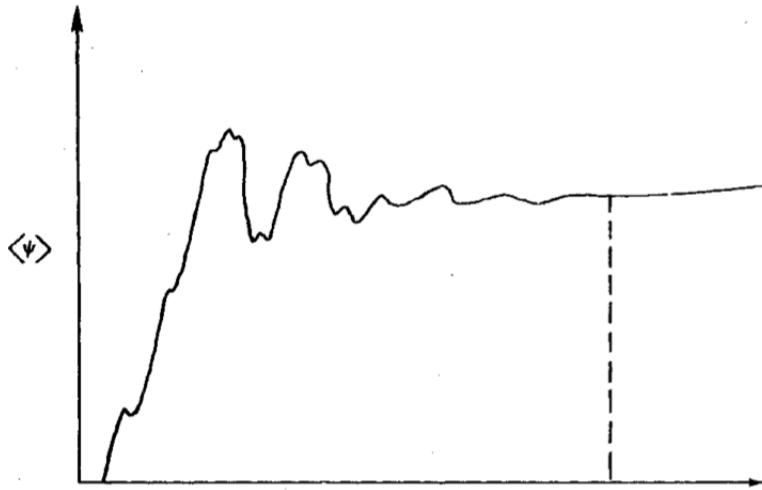


FIGURE 2.5: Andamento di una grandezza mediata $\langle\psi\rangle$ all'aumentare del volume [3]

Se visualizziamo l'andamento di una qualsiasi grandezza mediata $\langle\psi\rangle$ rispetto alla dimensione del volume di osservazione otteniamo un grafico come quello in figura 2.5. Questo grafico è stato creato assumendo che il punto associato al volume V su cui si effettua la media sia posizionato in una regione solida, così che V_f si nullo per valori piccoli di V . All'aumentare di V l'andamento di $\langle\psi\rangle$ è oscillante. Per valori di $V > V^*$ l'andamento risulta più morbido poiché le variazioni microscopiche diminuiscono la loro influenza; da notare che l'andamento di $\langle\psi\rangle$ è si più regolare ma il suo valore non è costante.

Si identificano due tipi differenti di media, il primo *superficiale* [3] definito come

$$\langle\psi_f\rangle = \frac{1}{V} \int_{V_f} \psi_f dV_f, \quad (2.14)$$

il secondo *intrinseco* definito come

$$\langle\psi_f\rangle^f = \frac{1}{V_f} \int_{V_f} \psi_f dV_f, \quad (2.15)$$

dove $V_f < V$ è il volume del fluido contenuto nel volume V . Le due medie sono collegate tra loro tramite la relazione $\langle \psi_f \rangle = \varepsilon \langle \psi_f \rangle^f$, dove $\varepsilon = V_f/V$ è la porosità che quantifica il volume occupato dal fluido rispetto al volume totale, la stessa definizione che si era data sulla base di osservazioni puramente geometriche ad inizio capitolo. Si nota che la porosità è una funzione della posizione. Così facendo è possibile utilizzare un'unica relazione per descrivere l'intero campo di moto, senza dover di distinguere due zone e due set di equazioni per la parte porosa e non. Le equazioni di Navier-Stokes mediate sul volume e di continuità derivate da Whitaker [10] per un fluido incomprimibile attraverso un corpo con porosità omogenea ed isotropa sono

$$\frac{\rho}{\varepsilon} \left(\frac{\partial \langle \mathbf{u} \rangle}{t} + \frac{\langle \mathbf{u} \rangle \cdot \nabla \langle \mathbf{u} \rangle}{\varepsilon} + \nabla \cdot \langle \tilde{\mathbf{u}} \tilde{\mathbf{u}} \rangle \right) = -\nabla \langle p \rangle^f + \frac{\mu}{\varepsilon} \nabla^2 \langle \mathbf{u} \rangle - \frac{\mu}{K} \langle \mathbf{u} \rangle - \frac{\mu}{K} \mathbf{F} \cdot \langle \mathbf{u} \rangle \quad (2.16)$$

e

$$\nabla \cdot \langle \mathbf{u} \rangle = 0 \quad (2.17)$$

dove è stato preferito usare la media intrinseca per la pressione, perché è la grandezza che si può misurare direttamente con una sonda sperimentale.

Nell'equazione (2.16) il termine di Darcy $\mu \frac{\langle \mathbf{u} \rangle}{K}$ rappresenta una resistenza viscosa mediata sul volume, mentre il termine di Forchheimer $\mu \mathbf{F} \cdot \frac{\langle \mathbf{u} \rangle}{K}$ è una resistenza dovuta agli effetti inerziali, con \mathbf{F} un tensore del secondo ordine. La fluttuazione di velocità $\tilde{\mathbf{u}}$ definita come $\tilde{\mathbf{u}} = \mathbf{u} - \langle \mathbf{u} \rangle$ è la differenza tra la velocità \mathbf{u} e la velocità media sul volume $\langle \mathbf{u} \rangle$.

Chapter 3

Air Por

In questo capitolo verrà presentato il materiale poroso utilizzato e la sua caratterizzazione tramite una prova sperimentale

3.1 Il materiale

Il materiale scelto come mezzo poroso è un copolimero a canalizzazione controllata realizzato da Air Por S.a.s. del Dott. Stefano Goglio. La caratteristica principale che ha fatto sì che questo fosse il materiale scelto per la prova è la sua modalità realizzativa. A differenza degli altri materiali presi in considerazione inizialmente (poliuretano e Styrofoam) questo materiale non è un polimero espanso. Esso viene ottenuto unendo assieme delle sferette di materiale solido preconstituite, le quali sono tutte della stessa dimensione garantendo una struttura interna uniforme e di conseguenza anche una porosità uniforme. Questa procedura garantisce inoltre di avere delle celle aperte, caratteristica imprescindibile per lo scopo di questo studio.

La porosità scelta del 30% e il materiale delle parti solide, PMMA, assicurano al materiale delle discrete caratteristiche meccaniche, che si riflettono nella capacità di poter essere lavorato dalle macchine utensili così da avere una buona precisione nelle lavorazioni per realizzare il pezzo da inserire sul modello, evitando superfici irregolari e non uniformi.

Nella tabella 3.1 sono riportate le principali caratteristiche del materiale utilizzato.

Densità	1.18 $\frac{g}{cm^3}$
Densità apparente	0.82 $\frac{g}{cm^3}$
Porosità	30%
Dimensioni particelle	300 μm

TABLE 3.1: Caratteristiche materiale poroso

3.1.1 Qualifica del materiale

Il materiale è stato sottoposto ad una prova per avere delle indicazioni sulla permeabilità del mezzo, unica grandezza che non è stata fornita dal produttore. Per effettuare questa prova è stato utilizzato un contenitore a forma di parallelepipedo a base quadrata di plexiglass con un foro centrale di forma quadrata dove è possibile fissare un supporto contenente un provino del materiale in esame. Le dimensioni del contenitore sono 500 x 500 x 250 mm mentre quelle del provino sono 100 x 100 x 42 mm. Il supporto è formato da un telaio in legno sulla quale è stata applicata della gomma, in modo tale da non mettere a contatto la superficie del legno, non è impermeabile, con l'acqua, il che avrebbe falsato i risultati. Il supporto viene appeso tramite 4 viti sul lato inferiore del contenitore; per evitare che l'acqua filtrasse tra le zone di giunzione sono state applicate delle guarnizioni idrauliche.

Fissato il supporto si riempie il contenitore di acqua lasciando che il fluido riempia il volume vuoto presente nel materiale. Una volta che il provino si è impregnato del tutto, inizia la misurazione.

Si mantiene il pelo libero del fluido ad una quota costante e si misura la portata d'acqua; che si ottiene semplicemente raccogliendo l'acqua che filtra attraverso il provino in un tempo di 30 secondi, pesandola e rapportandola al tempo impiegato. Questo procedimento restituisce chiaramente una portata media, che è congruente con il procedimento svolto dallo stesso Darcy nel suo esperimento.

Avere un volume di acqua grosso rispetto al provino ed in particolare una superficie del pelo libero ampia garantisce una buona accuratezza della costanza livello del fluido senza la necessità di sistemi di controllo sofisticati (è sufficiente un controllo visivo). Questa misura è stata effettuata per diverse altezze del pelo libero, che corrispondono a diversi ΔP .

Sono state effettuate più misurazioni per lo stesso livello del fluido per osservare e garantire che la prova fosse ripetibile. Nelle tabelle 3.2 e 3.3 sono riportati i valori medi e le deviazioni standard della quantità di acqua filtrata per ogni livello del pelo libero.

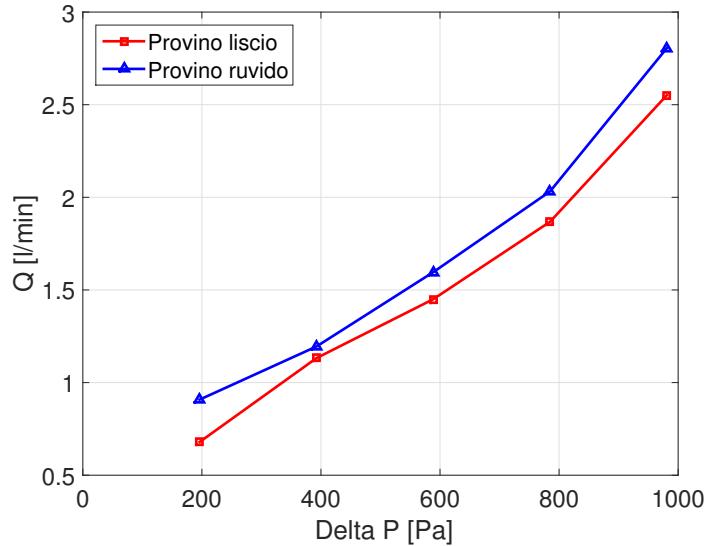
Pelo libero [m]	Valore medio [kg]	Std [%]
0.02	0.339	4.98
0.04	0.566	3.70
0.06	0.725	1.31
0.08	0.934	2.83
0.1	1.275	1.61

TABLE 3.2: Valori medi e deviazioni standard delle varie misure per ogni quota del pelo libero per il provino ruvido

Pelo libero [m]	Valore medio [kg]	Std [%]
0.02	0.454	2.48
0.04	0.597	3.97
0.06	0.798	0.69
0.08	1.016	1.77
0.1	1.402	2.20

TABLE 3.3: Valori medi e deviazioni standard delle varie misure per ogni quota del pelo libero per il provino liscio

Si nota che la deviazione standard delle varie prove è abbastanza contenuta, risulta infatti sempre inferiore al 5 %, valore che garantisce che le misure prese siano consistenti fra loro e che la prova abbia una sufficiente ripetibilità. Inoltre si è voluto indagare anche se una lavorazione superficiale del materiale modificasse la permeabilità, per avere un'indicazione su possibili rifiniture superficiali da effettuare sui provini da utilizzare poi nella prova in galleria del vento. La qualifica del materiale è stata quindi svolta con due provini, uno con la superficie ruvida ed un secondo con la superficie liscia. I risultati di questa prova sono mostrati nella figura 3.1, mentre gli altri dati sono riportati nelle tabelle 3.4 e 3.5

FIGURE 3.1: Grafico Δp portata

Come si può osservare dalla fig. 3.1 l'andamento della portata con ΔP non è lineare, perché i Reynolds ai quali sono state effettuate le prove, riportati nelle tabelle 3.5 e 3.4 sono superiori a quello per il quale si perde la linearità descritta da Darcy. Per descrivere il fenomeno bisogna utilizzare la legge di Forchheimer che introduce un termine quadratico rispetto alla velocità e di conseguenza rispetto alla portata.

Pelo libero [m]	ΔP [Pa]	Re_{mod}	Q [$\frac{l}{m}$]
0.02	196.2	90.8	0.908
0.04	392.4	119.4	1.194
0.06	588.6	159.6	1.596
0.08	784.8	203.2	2.032
0.1	981.0	280.5	2.805

TABLE 3.4: Caratteristiche provino ruvido

Pelo libero [m]	$\Delta P[Pa]$	Re_{mod}	$Q[\frac{l}{m}]$
0.02	196.2	67.9	0.679
0.04	392.4	113.2	1.132
0.06	588.6	145.0	1.450
0.08	784.8	186.8	1.868
0.1	981.0	255.1	2.551

TABLE 3.5: Caratteristiche provino ruvido

Come si nota dalla fig. 3.1 la lavorazione superficiale diminuisce leggermente la permeabilità, infatti a parità di ΔP la portata risulta minore. Alla fine di questa analisi si è deciso di utilizzare il materiale con la superficie ruvida, questo non tanto per la maggiore permeabilità che come si nota l'incremento è contenuto, ma per un altro aspetto osservato durante le prova. Infatti è stato riscontrato che per il provino con la superficie levigata il transitorio che portava ad avere una portata a regime era particolarmente lungo. La scelta di utilizzare il provino che garantisce un transitorio minore riduce le possibili fonti di incertezza che entrerebbero in gioco nella successiva prova sperimentale.

Una volta scelto il provino è possibile quantificare la permeabilità. Essendo nel campo non lineare della legge di Darcy, tramite interpolazione dei dati sono state determinati i due coefficienti sperimentali α e β presenti nell'equazione di Forchheimer:

$$-\nabla p = \frac{\mu}{\alpha}U + \beta\rho U^2 \quad (3.1)$$

i valori ottenuti sono $2.47413e - 07 \text{ m}^2$ per α e -0.0905 m^{-1} per β . È stata poi stimata in prima approssimazione la permeabilità lineare supponendo un andamento lineare tra il primo punto dei dati sperimentali e l'origine. La K lineare è pari a $1.1662e - 06 \text{ m}^2$ che in riferimento alla tabella 2.1 equivale alla permeabilità della ghiaia.

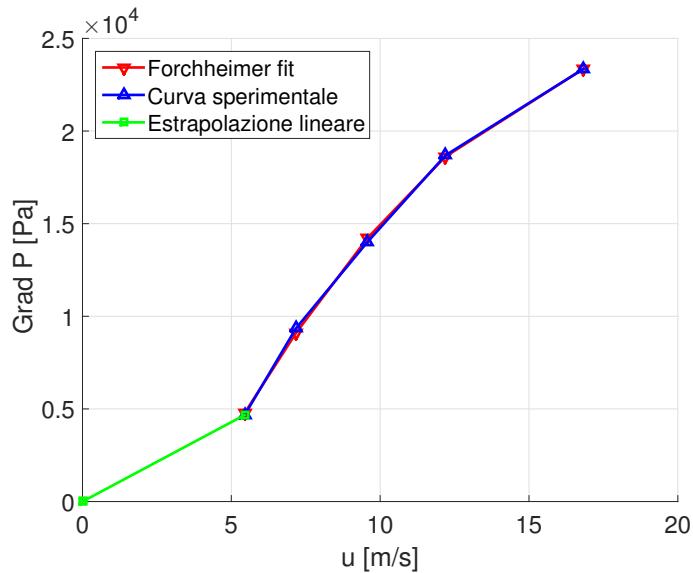


FIGURE 3.2: Confronto tra la curva sperimentale e teorica della velocità del fluido attraverso il materiale poroso e il ΔP applicato

Da questa prova è stato confermato un risultato particolare già anticipato dal fornitore del materiale. Questa particolarità è possibile identificarla con il segno di β nella (3.1), infatti guardando in letteratura β risulta sempre positivo, nel nostro caso invece il coefficiente del termine non lineare è negativo.

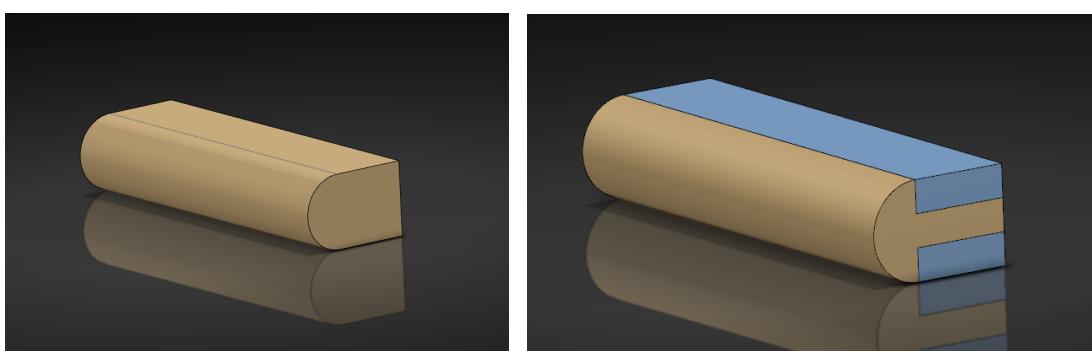
Chapter 4

Set-up sperimentale

In questo capitolo verranno presentati la strumentazione utilizzata per la prova ed il procedimento usato per l'acquisizione dei dati.

4.1 Modello

Il modello scelto per effettuare queste prove è un corpo tozzo a forma di D. Il modello è stato realizzato in legno nell'officina del dipartimento di Ing. Aerospaziale del Politecnico di Milano, ed è stato lavorato tramite una fresa a controllo numerico per avere un accuratezza sulle dimensioni elevata ed una buona finitura superficiale. Il modello è stato realizzato in duplice copia ed ad una di queste sono stati asportati i due spigoli posteriori in maniera simmetrica creando così uno spazio dove è possibile inserire degli inserti di materiale poroso, figura 4.1(b). Il secondo modello, figura 4.1(a), non lavorato, è stato utilizzato per avere una condizione di riferimento per poter eseguire i confronti necessari ed evidenziare così l'effetto del materiale poroso.



(a) Riferimento

(b) Con inserti porosi

FIGURE 4.1: Modelli CAD delle due configurazioni

Le dimensioni dei modelli sono:

- Altezza: 60 mm
- Lunghezza: 90 mm
- Larghezza 295 mm

mentre quella degli inserti sono:

- Altezza: 20 mm
- Lunghezza 60 mm
- Larghezza 295 mm

Al modello è poi stato praticato un foro da 12 mm di diametro sul lato sinistro per poter inserire una barra di acciaio così da poterlo fissare alla bilancia e tenerlo in posizione durante la prova. Il modello è stato infine completato con degli end plates circolari con diametro di 150 mm per diminuire gli effetti 3D dovuti all'estremità del modello rendendolo il più possibile simile ad un caso 2D. I modelli sono stati posizionati al centro della galleria avendo la possibilità di posizionare la sonda a filo caldo a diverse distanze dal modello, in particolare circa 0.5, 2 e 3 volte la dimensione trasversale del modello, che successivamente verrà identificata con il termine diametro e indicata con D. Queste distanze sono state scelte a seconda della possibilità di introdurre la sonda nella camera di prova e il loro valore è dovuto all'apertura sulla parete degli appositi fori, l'indicatore 2 nell'immagine [4.2](#).

4.2 Galleria del Vento

La galleria del vento utilizzata per le prove sperimentali è la galleria didattica EA103 della DeltaLab presente nel laboratorio aerodinamico del CLASD. Il modello EA013 è una galleria del vento subsonica ad aspirazione a circuito aperto. Nell'immagine [4.2](#) è mostrato lo schema della galleria del vento.

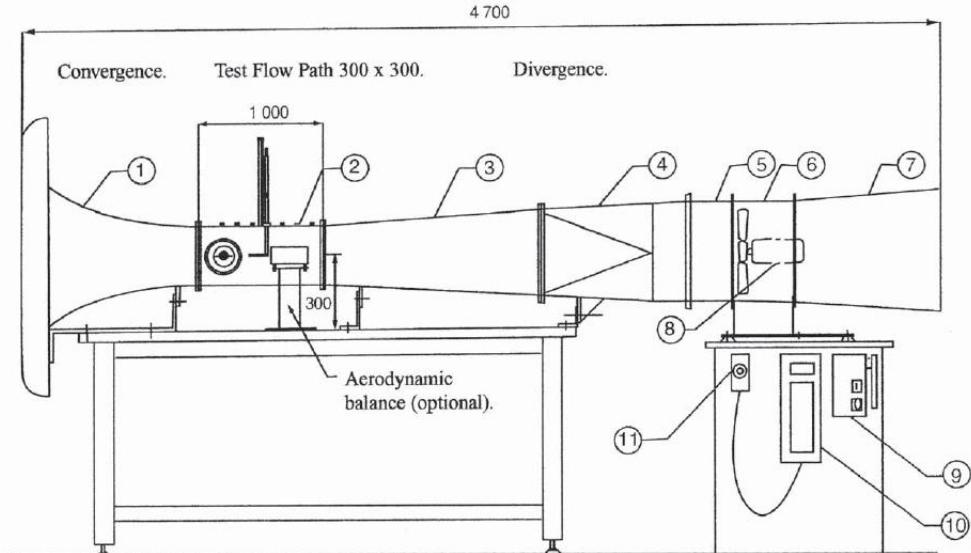
**EA 103 Wind Tunnel.**

FIGURE 4.2: Schema della galleria del vento EA103 DeltaLab

Nella tabella 4.1 sono invece riportate le caratteristiche geometriche e i dati sul motore della galleria del vento.

TABLE 4.1: Caratteristiche Galleria del Vento

Caratteristiche Galleria del Vento	
Lato camera di prova	300 mm
Lunghezza camera di prova	1000 mm
Velocità massima	40m/s
Potenza motore	4 kW

La prima operazione che è stata fatta è quella di verificare la taratura della galleria. Per fare ciò è stato posizionato un tubo di Pitot al centro della galleria e si sono prese le misure della pressione dinamica del pitot al variare della velocità di giri del motore della galleria. In contemporanea sono state prese i valori di pressione statica misurati sulla partete all'imbocco della camera di prova ed è stata calcolata la relativa pressione dinamica rispetto alla pressione totale dell'ambiente circostante. Nella tabella 4.2 vengono riportati a seconda della posizione della manopola che controlla la potenza del motore i valori della pressione dinamica di riferimento e del pitot.

TABLE 4.2: Valori pressione utilizzati per la taratura della galleria del vento

Posizione manopola	$\Delta P_{rif}[Pa]$	$\Delta P_{pit}[Pa]$
1.0	5.806	4.712
1.5	22.213	18.353
2.0	52.757	44.890
2.5	87.970	74.900
3.0	138.834	117.558
3.5	216.077	183.902
4.0	290.290	247.145
4.5	434.173	371.524
5.0	492.736	424.475

Da questi dati con un'operazione di regressione lineare è stata definita la curva di taratura che permette di ricavare la pressione dinamica a centro vena partendo dalla statica a parete all'inizio della camera di prova. Questo è utile perché così è possibile conoscere con buona approssimazione la velocità della galleria anche quando è presente un modello che impedirebbe l'uso del pitot, inoltre un secondo effetto importante è quello di poter scegliere una velocità nonostante il controllo della galleria sia solamente sulla potenza del motore. La curva misurata è mostrata nella figura 4.3

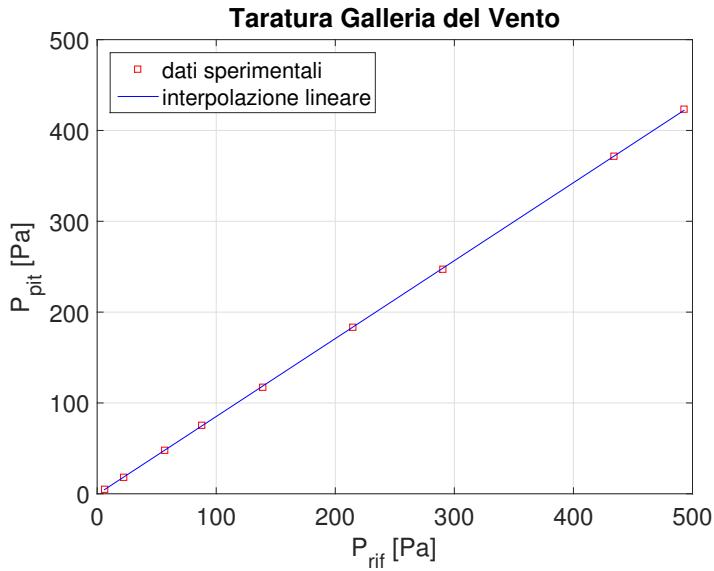


FIGURE 4.3: Curva di taratura della galleria del vento

La curva è del tipo:

$$\Delta P_{pit} = K \cdot \Delta P_{rif} + Offset \quad (4.1)$$

e K è la costante di taratura. Nel nostro caso K è pari a 0.858 mentre l' $Offset$ è uguale a -0.796 Pa che è un valore abbastanza basso che conferma una buona qualità della taratura.

Per le misure di pressione sono stati usati i trasduttori Druck LPM9000 con range $0 \div 20$ mbar e $-20 \div 20$ mbar. In particolare il primo per la misurazione della statica a parete mentre il secondo è stato collegato ai due canali del tubo di pitot. Per la pressione totale è stato utilizzato un barometro assoluto. In appendice sono allegati i datasheet di questi trasduttori per delle informazioni più dettagliate.

4.3 Anemometro a filo caldo

L'anemometro a filo caldo è costituito da un filamento metallico il cui diametro è dell'ordine di qualche μm e la lunghezza di 3-5 mm; sostenuto da due "rebbi". Il filamento viene posto nella corrente in modo che l'asse principale sia perpendicolare alla direzione del vento.

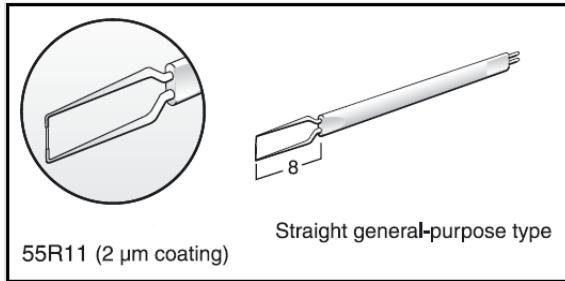


FIGURE 4.4: Sonda anemometro a filo caldo

Il filamento è percorso da una corrente di intensità I e ha una resistenza elettrica R_w . Per effetto Joule, la potenza elettrica dissipata in calore nel filo a causa del passaggio della corrente I è bilanciata dal raffreddamento aerodinamico convettivo:

$$W = I^2 R_w = hS(T_w - T_c) \quad (4.2)$$

dove h è il coefficiente di scambio termico, S è la sezione del conduttore, T_w e T_c sono la temperatura del filo e della corrente fluida. Il coefficiente di scambio h aumenta all'aumentare della velocità v secondo una relazione del tipo:

$$h = b + av^{0.5} \quad (4.3)$$

In seguito a un aumento della velocità v , aumenta pertanto il coefficiente di scambio $h(v)$, di conseguenza diminuisce la temperatura T_W del filo, per cui diminuisce la resistenza R_w : se il filo è alimentato, come nel nostro caso, da una corrente di intensità $I = \text{cost}$, varia anche V e alla fine si stabilisce una nuova condizione di equilibrio. Misurando lo sbilanciamento di tensione si ottiene la velocità che investe il filamento

Con un procedimento simile a quello svolto per la taratura della galleria è stata eseguita la calibrazione del filo caldo. Questo tipo di sonda richiede però alcuni passaggi preliminari aggiuntivi. Come primo passaggio si posiziona una sonda di cortocircuito nel porta sonda per calcolare la resistenza complessiva dei cavi, che rimane costante durante la prova, e quindi è da considerare un offset del sistema. Dopo aver posizionato la sonda reale, alimentata e fatto gli zeri con un procedimento del tutto simile si mette in moto la galleria e si misura il valore di tensione corrispondente agli estremi del ponte di resistenze. Facendo questo procedimento a diverse velocità si determinano dei punti attraverso i quali determinare la curva di taratura. A differenza di quanto fatto con la taratura della galleria, il rapporto tra la velocità e la tensione misurata non è lineare.

4.4 Processo di acquisizione dati

Le misurazioni sono state effettuate a 3 distanze dal bordo d'uscita del corpo tozzo, in particolare a 0.5 diametri, a 2 diametri e 3 diametri. La velocità di prova della galleria è di 10m/s (dove non è incluso l'effetto del bloccaggio) la quale determina un numero di Reynolds pari a 36000, calcolato sulla dimensione trasversale del modello. È utile ricordare la geometria del modello, mostrata in figura 4.5. Il traverso del filo caldo parte dal piano di simmetria del modello posto $y = 0$ mm e si sposta verso l'alto in direzione y con un passo di 2 mm, fino alla quota di 72 mm, una zona di interesse è quella intorno ai 30 mm che corrisponde allo spigolo superiore del modello. In ogni punto si è effettuata l'acquisizione per 30 s alla frequenza di 20 kHz, il segnale viene filtrato analogicamente a 10 kHz.

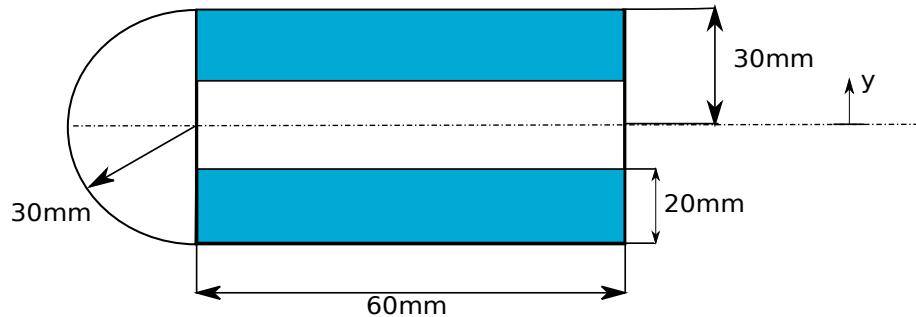


FIGURE 4.5: Schema 2D della sezione del modello

Di seguito sono riportati per punti i passaggi della procedura di acquisizione dei dati. Il tutto consiste in 5 passaggi:

1. la sonda viene posizionata sul portasonda e si procede alla lettura degli zeri delle varie grandezze in esame;
2. viene accessa la galleria e portata alla velocità desiderata;
3. viene portata in posizione la sonda;
4. viene avviata l'acquisizione per 30 sec;
5. si salvano i dati campionati in 2 file, uno contenente la storia temporale della velocità, e il secondo contenente tutti i valori medi delle grandezze (velocità misurata del filo caldo, velocità della galleria, temperatura e densità);
6. la sonda viene spostata nella nuova posizione e si riprende dal punto 3;

Questa procedura viene eseguita per entrambi i modelli e per le tre posizioni della sonda. L'acquisizione è gestita da un codice scritto con il software LabView, collegato alla strumentazione tramite una scheda di acquisizione CompactDAQ.

Chapter 5

Analisi risultati

In questo capitolo verranno presentati e commentati i risultati ottenuti dalle prove in galleria del vento. Grazie alla simmetria tutti i grafici presentati si riferiranno solamente alla metà superiore del campo di moto.

5.1 Momenti statistici

Essendo la turbolenza un fenomeno stocastico una prima analisi è stata effettuata calcolando, dai dati misurati con il filo caldo, i primi quattro momenti statistici, ottenendo così i profili di media, varianza, skewness e kurtosis della velocità. Sono stati calcolate anche le funzioni di densità di probabilità della velocità.

5.1.1 Media

I profili medi di velocità riportati di seguito sono stati calcolati con la (5.1)

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_i \quad (5.1)$$

ed è stata effettuata un'adimensionalizzazione in modo che la velocità esterna alla scia sia pari ad 1, utilizzando come velocità quella misurata alla quota di 72 mm, che è esterna alla scia e tiene in considerazione l'effetto del bloccaggio nella camera di prova.

Nella tabella 5.1 sono riportati i valori di velocità v_{ext} utilizzati per scalare i profili medi. Si può notare che i vari valori risultano molto simili tra loro, la differenza tra la velocità con cui si adimensionalizzano i dati per i due provini differiscono al massimo

dell' 1 %. Questo garantisce la consistenza dell'operazione nonostante solitamente si usi la velocità di galleria, che in questo caso non terrebbe conto, come detto prima, dell'effetto del bloccaggio non trascurabile in questa prova, essendo pari al 20 %.

TABLE 5.1: Velocità esterne

Posizione	Provino	$v_{gall}[m/s]$	$v_{ext}[m/s]$
0.5 D	Riferimento	10.05	12.08
0.5 D	Airpor	10.11	11.96
2.0 D	Riferimento	10.13	11.04
2.0 D	Airpor	10.14	11.08
3.0 D	Riferimento	10.13	10.35
3.0 D	Airpor	10.15	10.49

Si nota che i profili medi di velocità sono abbastanza simili tra il modello con il materiale poroso e quello di riferimento. Si differenziano nel profilo di velocità più distante dal corpo dove la velocità media del profilo con il materiale poroso è più alta rispetto al modello pieno. Si può ipotizzare quindi che l'inserto poroso possa aiutare il recupero di velocità riducendo la lunghezza della scia [11]

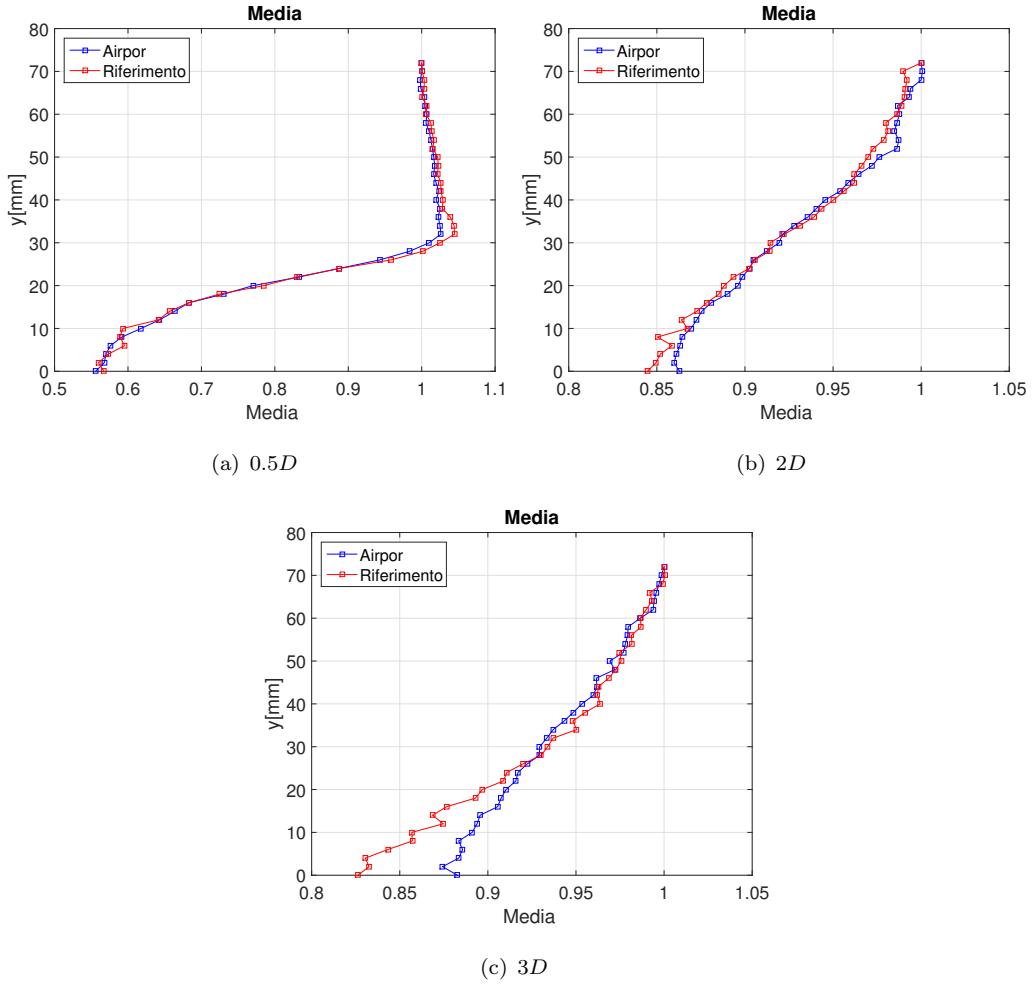


FIGURE 5.1: Media

5.1.2 Varianza

La varianza è stata calcolata secondo la definizione (5.2)

$$var = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N |x_i - \mu|^2 \quad (5.2)$$

come per la media, anche la varianza è stata adimensionalizzata con la velocità esterna alla scia, in questo caso con il quadrato di v_{ext} ,

$$var_{adi} = \frac{var}{v_{ext}^2} \quad (5.3)$$

Osservando l'andamento con la coordinata y del secondo momento statistico, si nota che il modello con il provino poroso riduce la varianza.

Dall'andamento della varianza si può anche individuare qualitativamente la zona di confine tra la scia dove le oscillazioni sono maggiori e la parte esterna dove le varianze diminuisce.

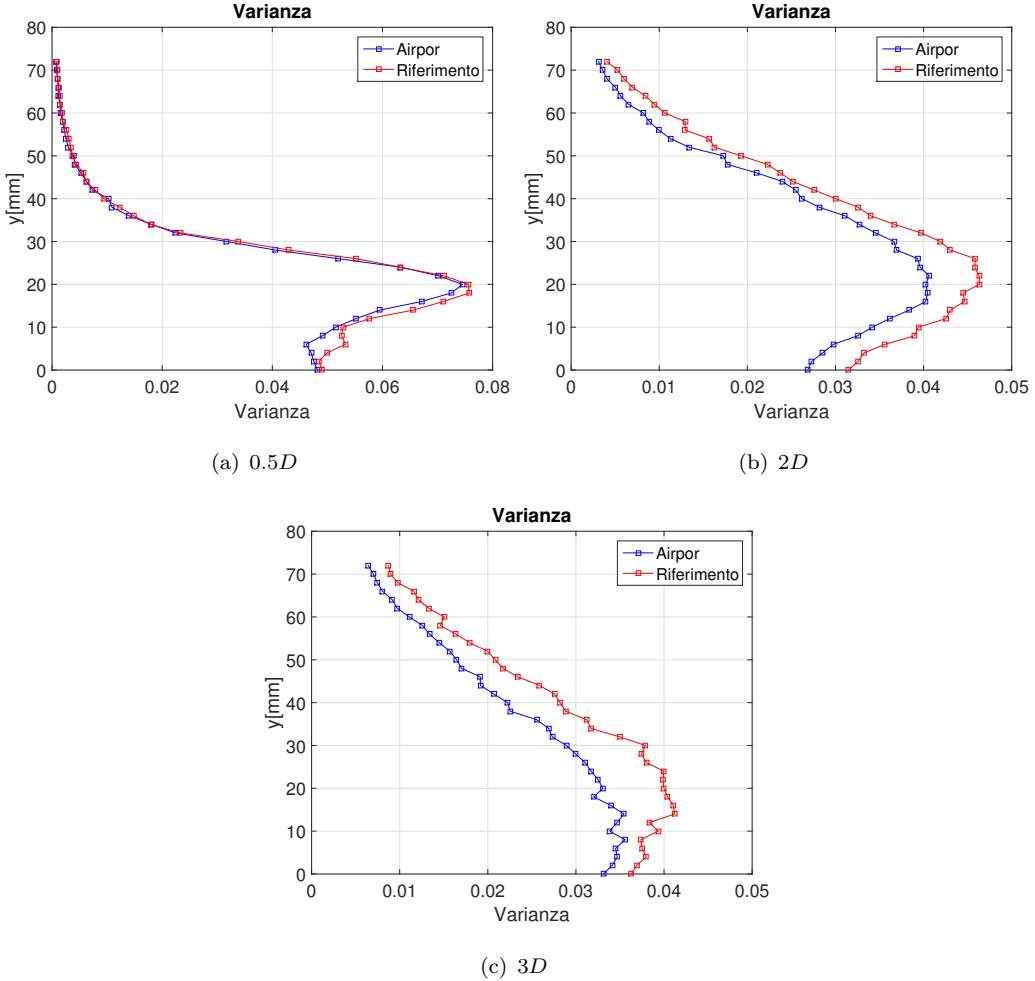


FIGURE 5.2: Varianza

5.1.3 Intensità turbolenta

Con i due momenti statistici appena calcolati è possibile definire un ulteriore indicatore, l'intensità turbolenta, calcolata come rapporto tra la varianza della velocità ed il suo valore medio (5.4):

$$I = \sqrt{\frac{\sigma_u^2}{\bar{u}}} \quad (5.4)$$

la figura 5.3 mostra l'andamento dell'intensità turbolenta al variare della posizione di campionamento. Si nota, oltre alla prevedibile diminuzione del modulo dell'intensità

spostandosi verso l'esterno della scia, anch'è una differenza tra i due modelli. In particolare il modello di riferimento ha una intensità maggiore rispetto al modello con gli inserti di materiale poroso.

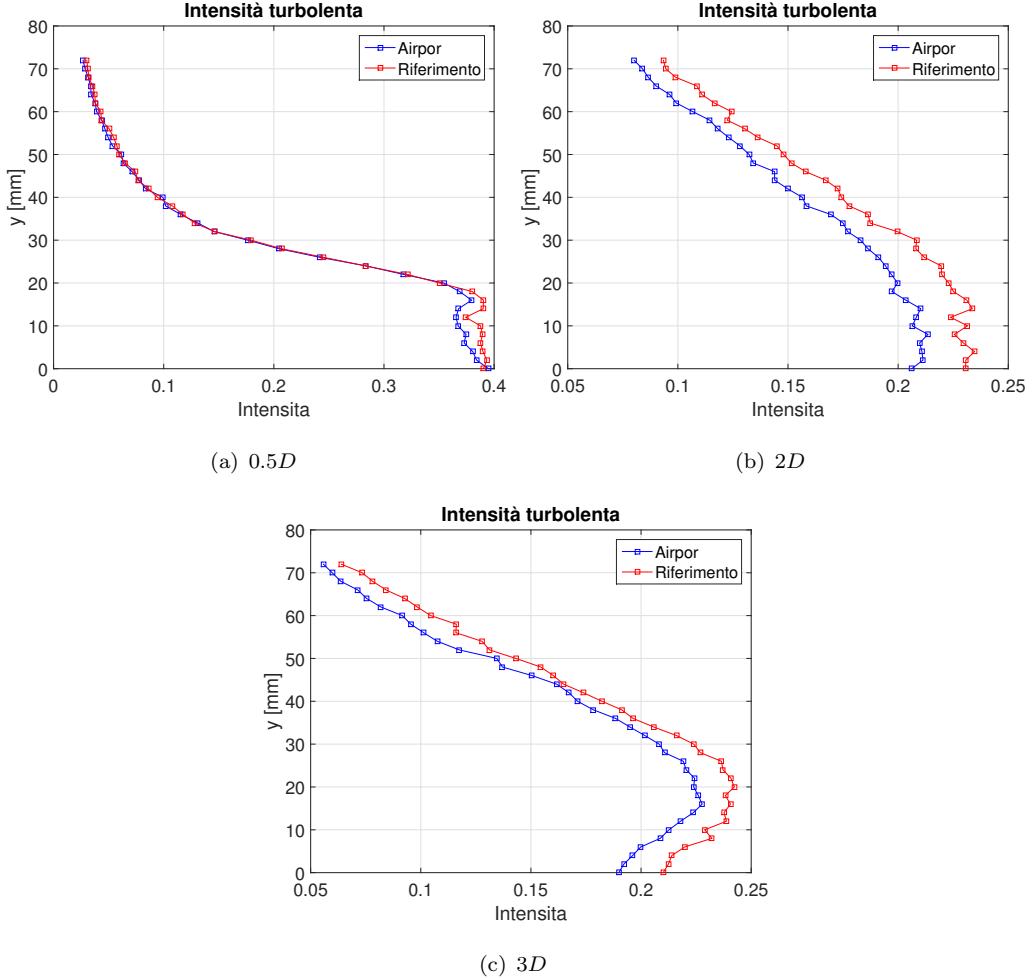


FIGURE 5.3: Intensità turbolenta

5.1.4 Skewness

Oltre alla media e alla varianza è possibile calcolare anche i momenti statistici superiori. La skewness calcolata secondo la definizione (5.5)

$$ske = \frac{E(x - \mu)^3}{\sigma^3} \quad (5.5)$$

misura la simmetria rispetto alla valor medio della distribuzione statistica dei campioni. Anche la skewness è minore per il modello con gli inserti di materiale poroso, la *pdf* è quindi leggermente asimmetrica e spostata verso i valori di velocità inferiori a quello

medio. Si noti però l'andamento irregolare con y , indice di una non piena convergenza.

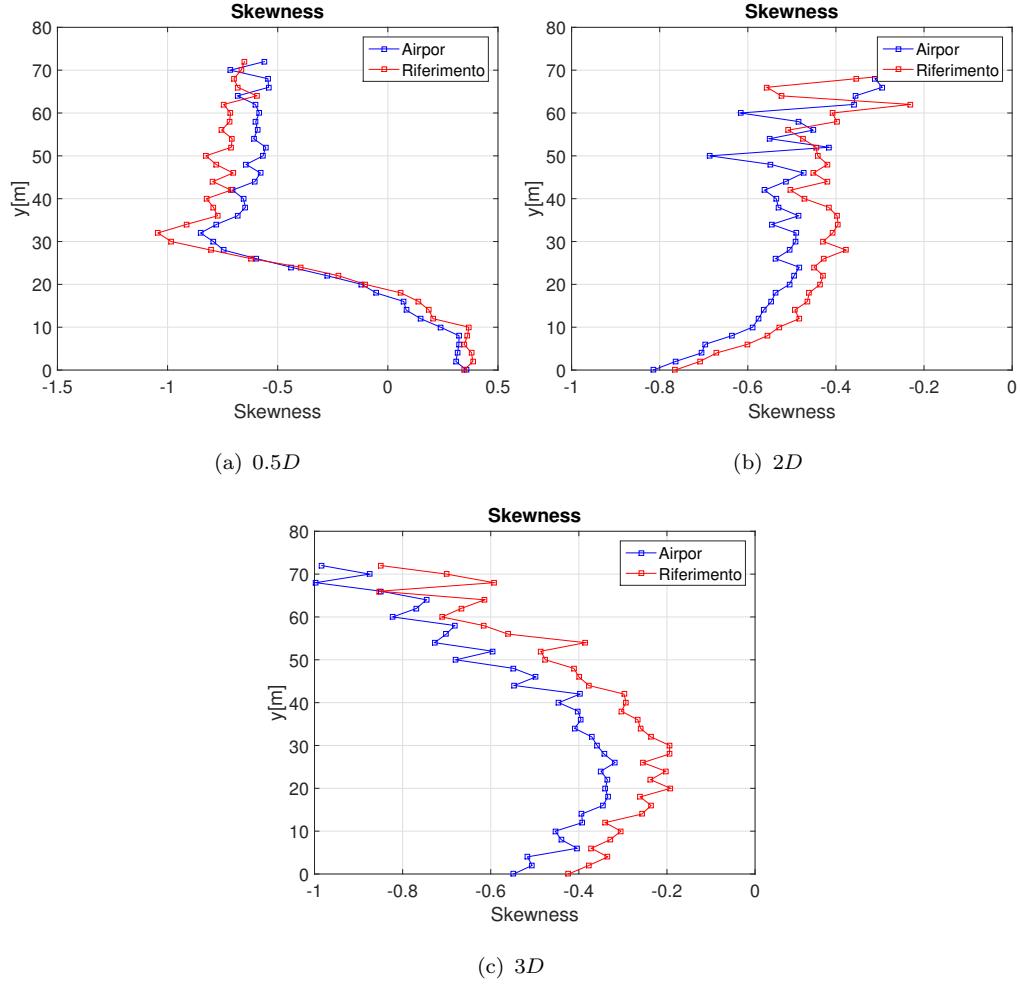


FIGURE 5.4: Skewness

5.1.5 Kurtosis

Il momento quarto che da un'indicazione su quanto è appiattita la *pdf* del segnale, calcolata come (5.6),

$$kur = \frac{E(x - \mu)^4}{\sigma^4} \quad (5.6)$$

risulta invece molto simile tra i due modelli. Si osserva invece che il suo valore è maggiore di 3, valore tipico per una distribuzione normale, e quindi identifica una *pdf* con la parte centrale della curva più appuntita rispetto ad una distribuzione Gaussiana.

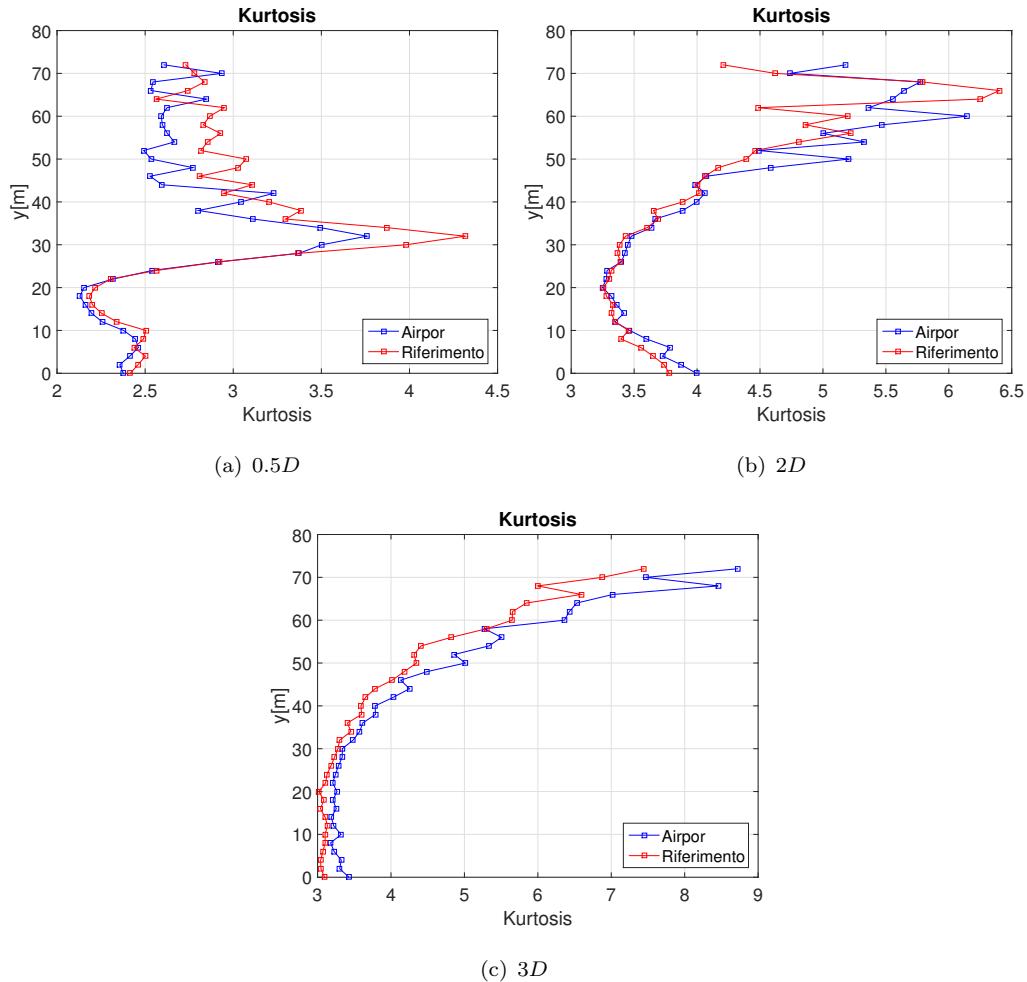
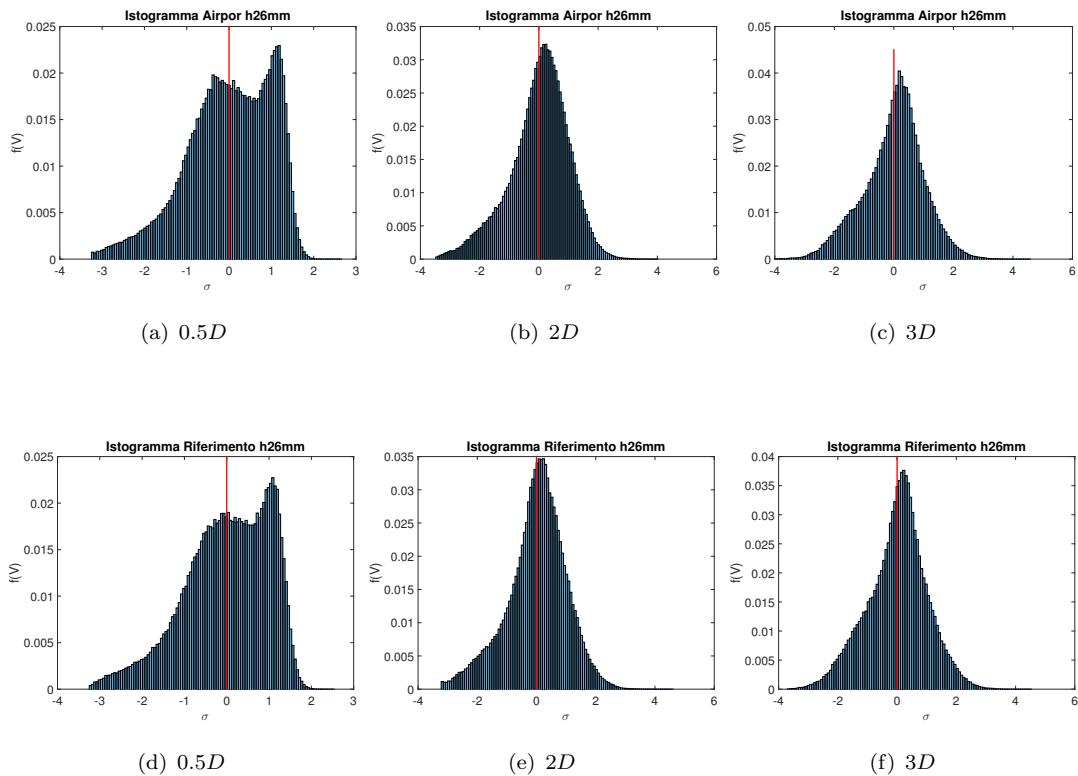
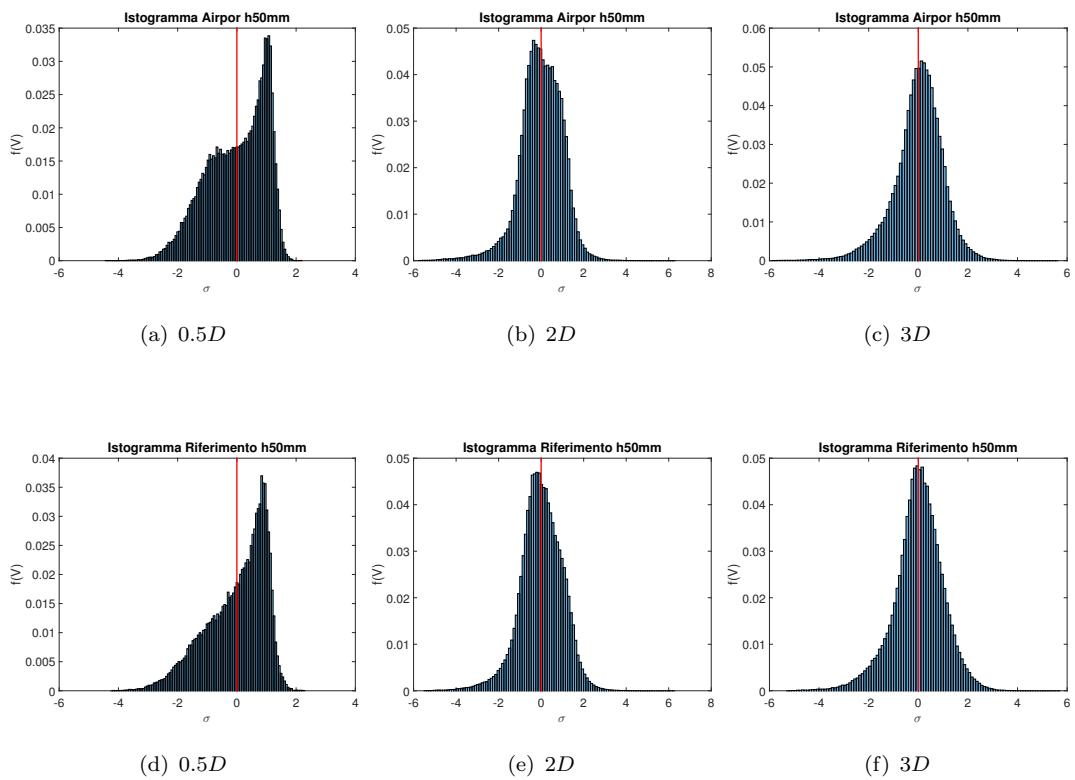
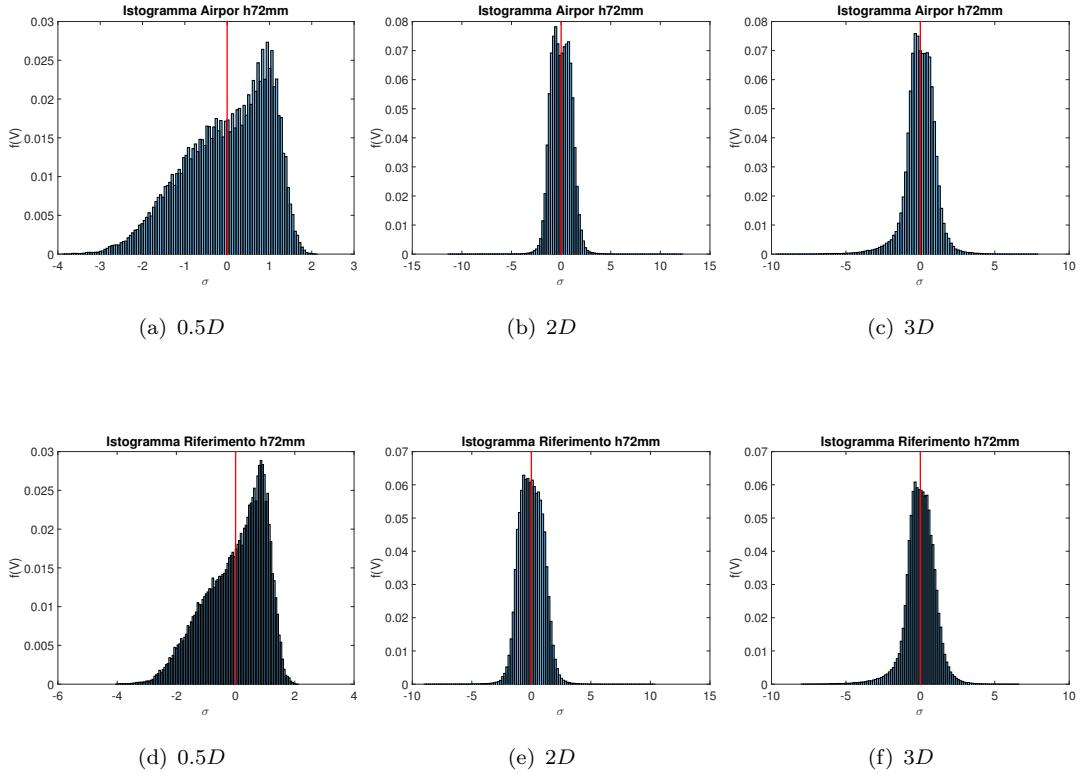


FIGURE 5.5: Kurtosis

Da queste immagini si osserva che la scia si fonde con lo strato limite della parete superiore della galleria, questo fenomeno è identificato con i valori alti del momento 4 quarto come si nota nella 5.5 (c).

Di seguito sono riportati alcune distribuzioni di probabilità per entrambi i modelli per le quote di 26, 50 e 72mm, dove si possono notare le informazioni presenti nei profili dei momenti statistici, con una vista più globale. Partendo dalla storia temporale a cui è stato sottratto il valore medio per avere i dati delle sole fluttuazioni e in seguito sono stati scalati con il valore della deviazione standard. I valori delle velocità così ottenuti sono stati suddivisi in 100 intervalli e su questi è stato calcolato l'istogramma della frequenza. Avendo normalizzato unitaria l'area dell'istogramma, la loro forma rappresenta la *pdf* del segnale sul punto di misura.

FIGURE 5.6: Istogrammi $h = 26$ mmFIGURE 5.7: Istogrammi $h = 50$ mm

FIGURE 5.8: Istogrammi $h = 72$ mm

Come si è può notare dai momenti statistici e dagli istrogrammi la distribuzione differisce marcatamente da una distribuzione normale, situazione inaspettata soprattutto nelle zone esterne alla scia, dove si poteva prevedere dei valori di skewness e kurtosis rispettivamente pari a 0 e 3.

5.2 Correlazione

Dopo l'analisi dei momenti statistici, è stato effettuato uno studio della funzione di autocorrelazione temporale, calcolata con la (5.7).

$$R_{xx}(\tau) = E[x_k \cdot x_{k-\tau}] \quad (5.7)$$

Dove v_k è la velocità in posizione k nel vettore delle velocità campionate e τ è lo sfasamento temporale tra due velocità. Nelle figure seguenti viene mostrata la correlazione calcolata sull'intero dataset, ma focalizzando l'attenzione su uno scostamento massimo di 1 e 0.1 secondi.

La prima osservazione riguarda la forma della curva, che non risulta monotona, ma è caratterizzata fin da subito da oscillazioni marcate. Questo è dovuto al fenomeno di shedding

che a questo Re è molto marcato, come si può osservare anche dagli spettri presentati nella sezione successiva. Conferma di ciò si ha dal fatto che il periodo delle oscillazioni equivale al periodo della frequenza di shedding come discusso in seguito.

Un secondo risultato interessante riguarda l'inviluppo delle oscillazioni, si nota infatti che l'area sottessa dall'inviluppo è maggiore per il modello con il materiale poroso rispetto a quello di riferimento. Questo è vero per le misurazioni effettuate nella zona più vicina al modello mentre non è sempre verificato nelle altre posizioni di misura, dove le due alcune correlazioni risultano molto simili o, in alcuni casi, il segnale più correlato risulta quello del modello di riferimento. Una possibile interpretazione per questi dati, può essere quella esposta Beruneau e Mortazavi nel loro articolo del 2008 [12]. Loro proponevano che la presenza di uno strato poroso potesse portare ad una regolarizzazione dei fenomeni presenti in scia. In particolare si potrebbe ipotizzare che questo fenomeno di regolarizzazione sia più marcato nella zona prossima al modello e che vada diminuendo allontanandosi da esso.

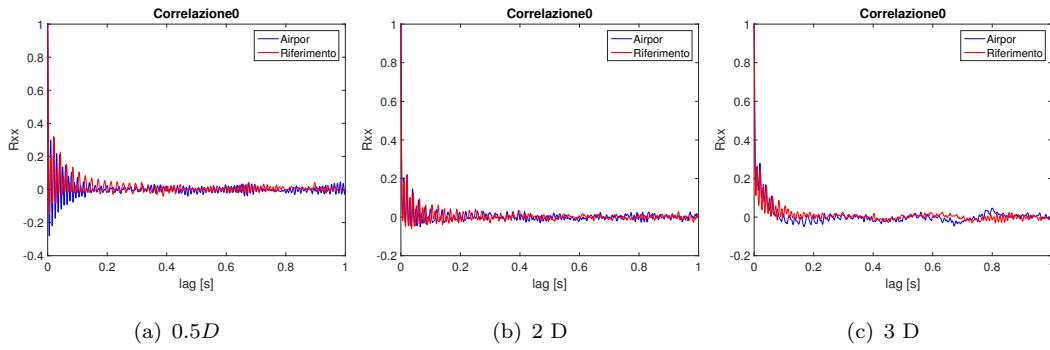


FIGURE 5.9: Correlazione $h=0\text{mm}$ - 1sec

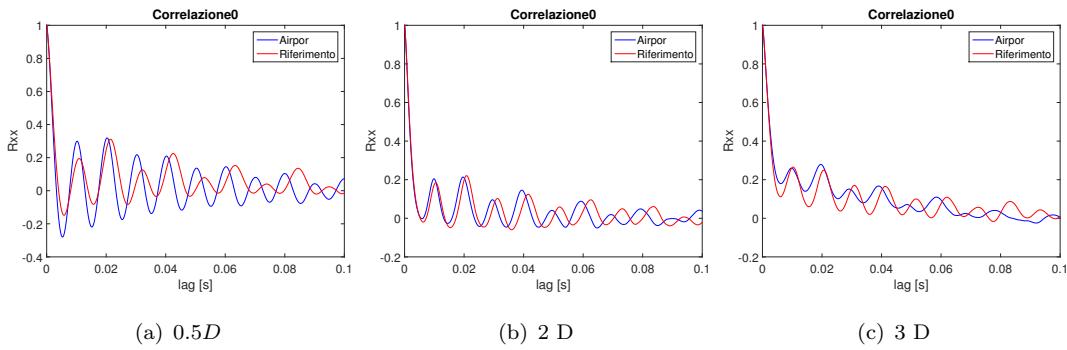
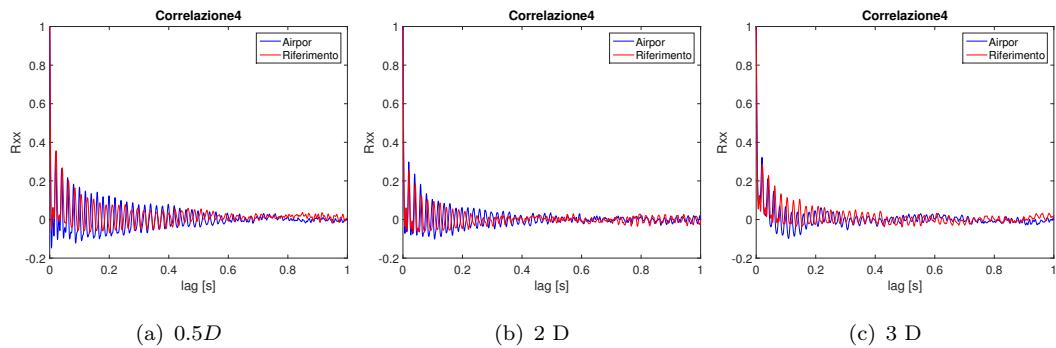
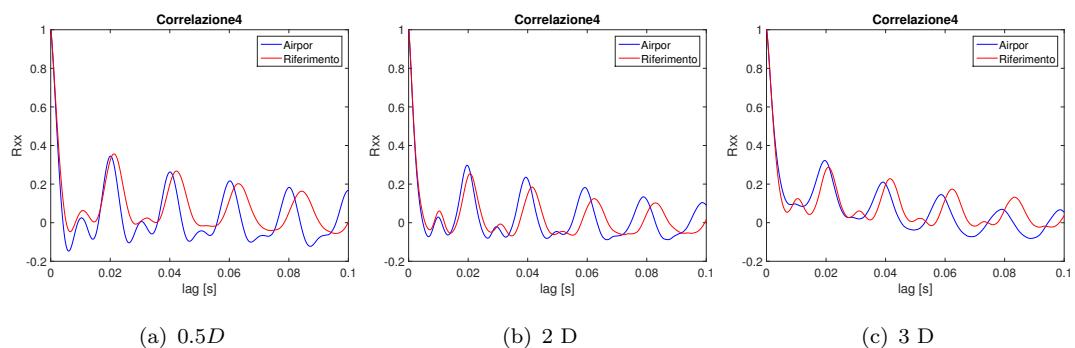
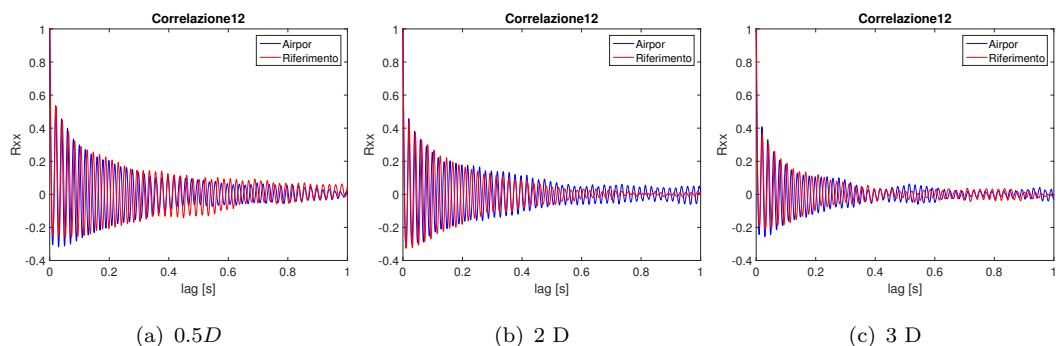
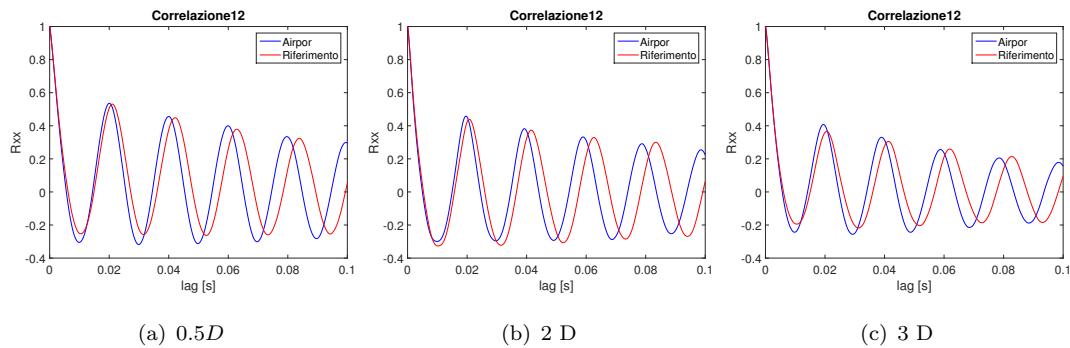
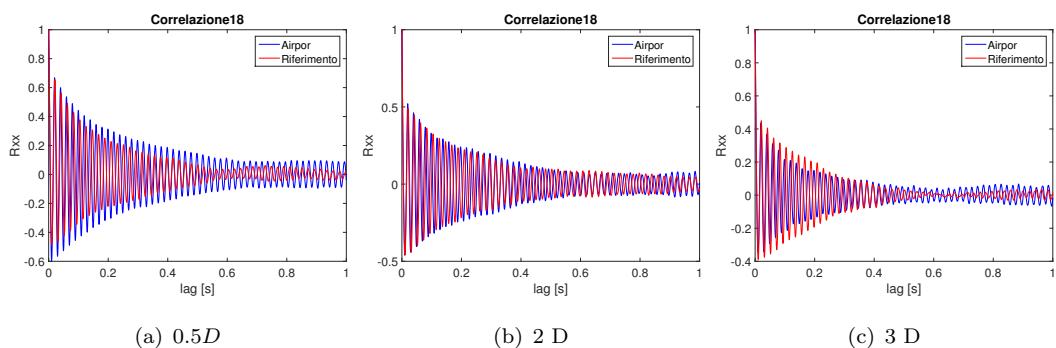
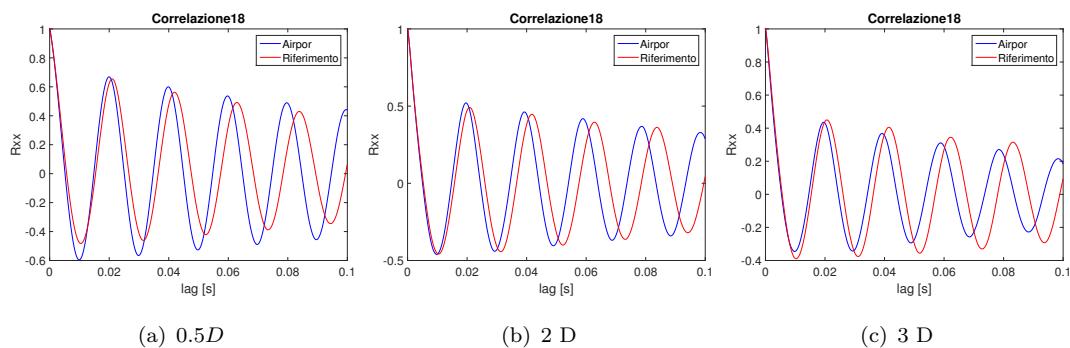


FIGURE 5.10: Correlazione $h=0\text{mm}$ - 0.1sec

FIGURE 5.11: Correlazione $h=4\text{mm}$ - 1secFIGURE 5.12: Correlazione $h=4\text{mm}$ - 0.1secFIGURE 5.13: Correlazione $h=12\text{mm}$ - 1sec

FIGURE 5.14: Correlazione $h=12\text{mm}$ - 0.1sec FIGURE 5.15: Correlazione $h=18\text{mm}$ - 1sec FIGURE 5.16: Correlazione $h=18\text{mm}$ - 0.1sec

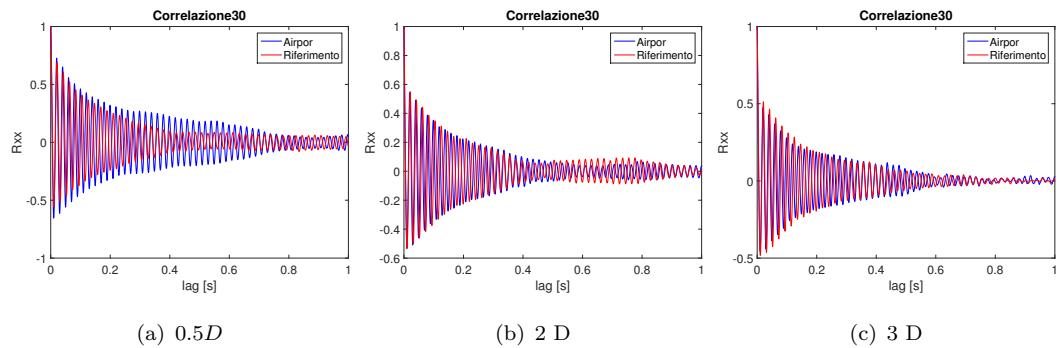


FIGURE 5.17: Correlazione h=30mm - 1sec

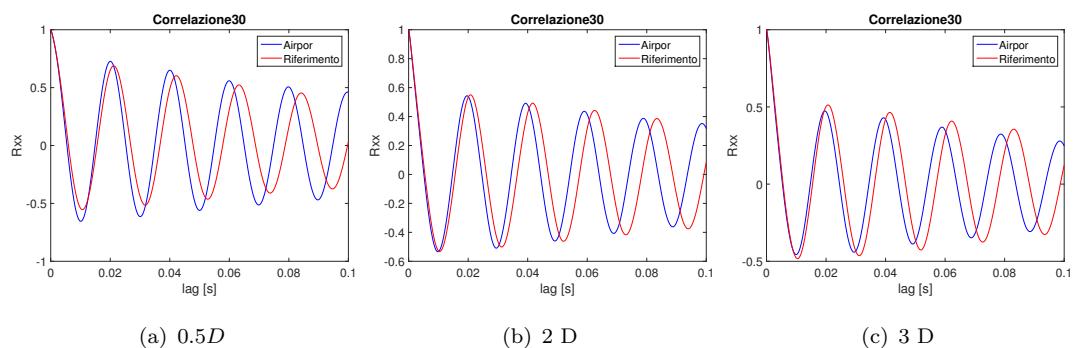


FIGURE 5.18: Correlazione h=30mm - 0.1sec

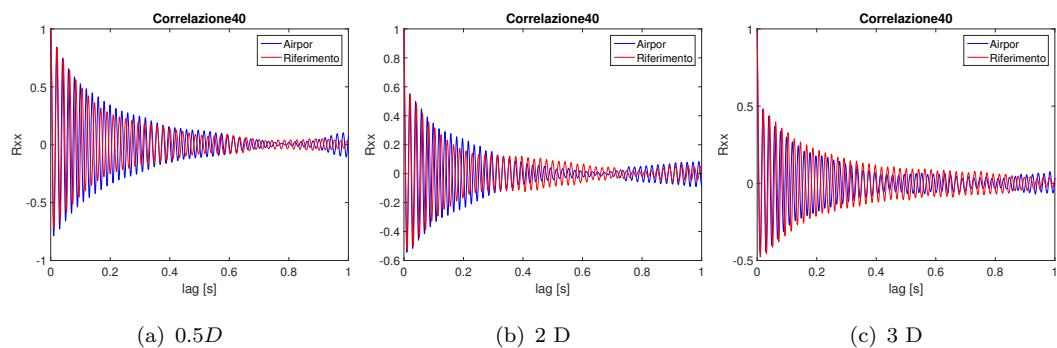
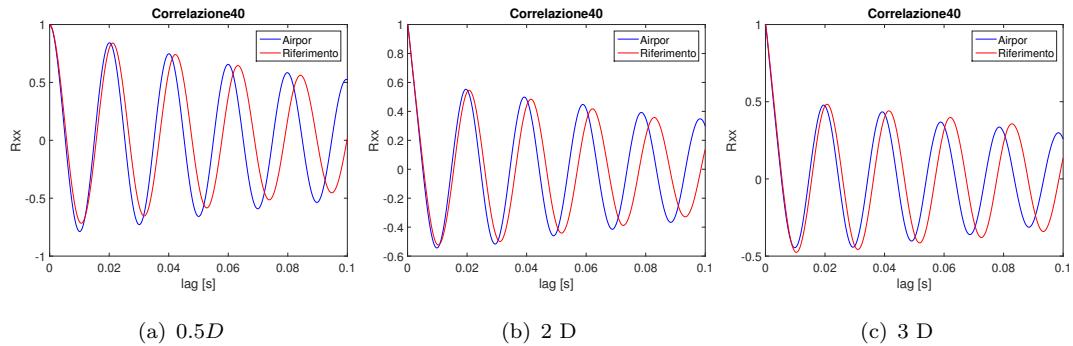
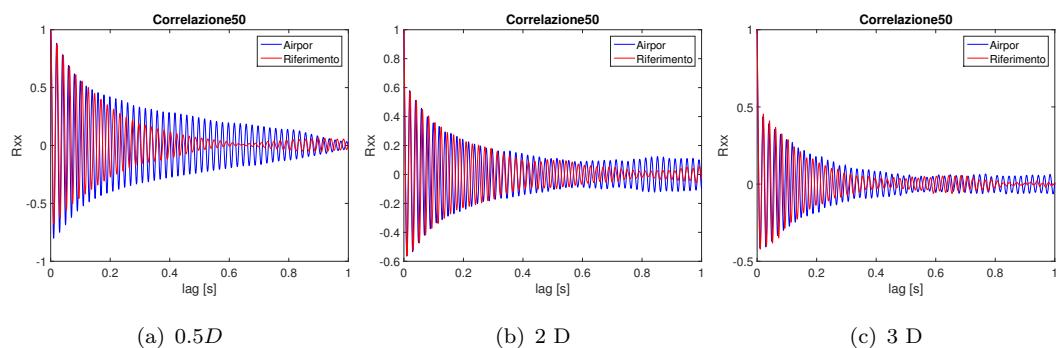
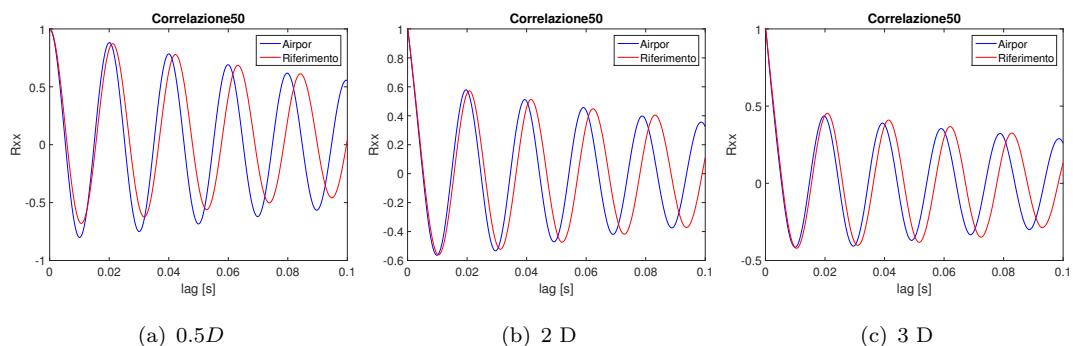


FIGURE 5.19: Correlazione h=40mm - 1sec

FIGURE 5.20: Correlazione $h=40\text{mm}$ - 0.1sec FIGURE 5.21: Correlazione $h=52\text{mm}$ - 1sec FIGURE 5.22: Correlazione $h=50\text{mm}$ - 0.1sec

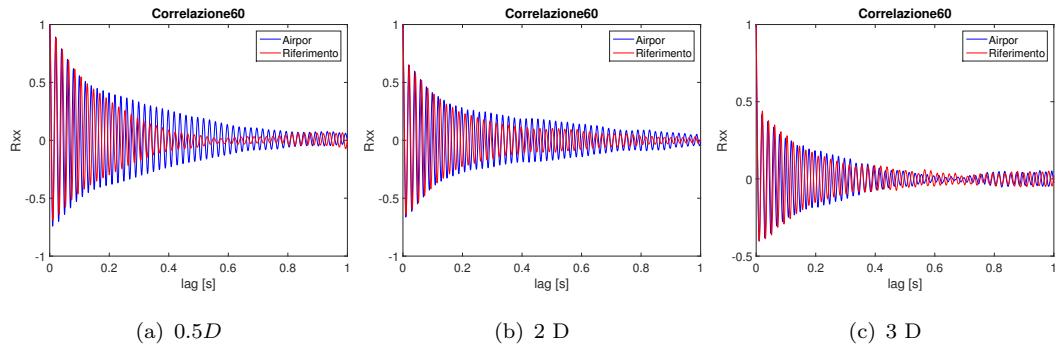


FIGURE 5.23: Correlazione h=60mm - 1sec

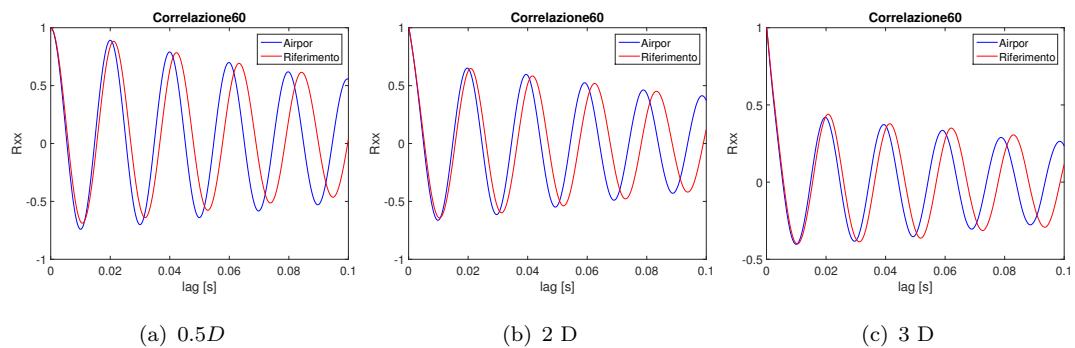


FIGURE 5.24: Correlazione h=60mm - 0.1sec

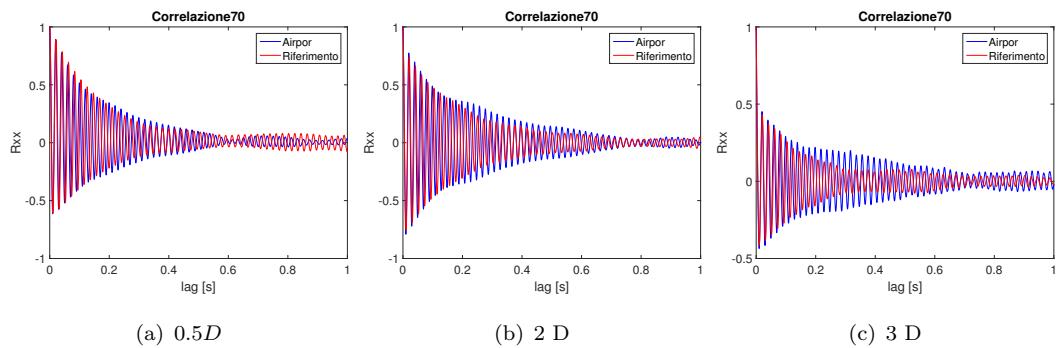
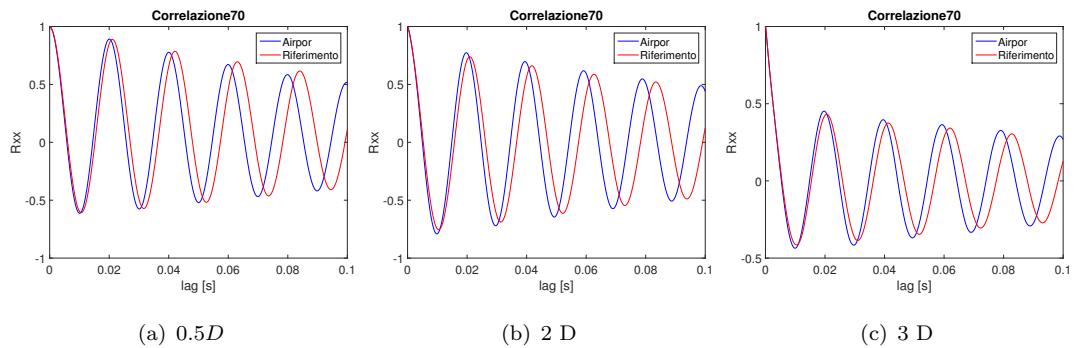


FIGURE 5.25: Correlazione h=10mm - 1sec

FIGURE 5.26: Correlazione $h=70\text{mm}$ - 0.1sec

5.3 Spettro

Una terza analisi è stata effettuata calcolando e osservando gli spettri di potenza del segnale, calcolati come la definizione (5.8)

$$E_{11}(\omega) = \mathcal{F}(v(t)) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} v(t)e^{-j\omega t} dt \quad (5.8)$$

dove $v(t)$ è la funzione delle velocità misurate dal filo caldo in funzione del tempo. Dalle immagini si distingue immediatamente la presenza di un picco intorno ai 45 Hz e, negli spettri misurati in prossimità del piano di simmetria della galleria, un ulteriore picco intorno ai 90 Hz. Questi picchi sono stati identificati come la frequenza di shedding e la sua prima armonica.

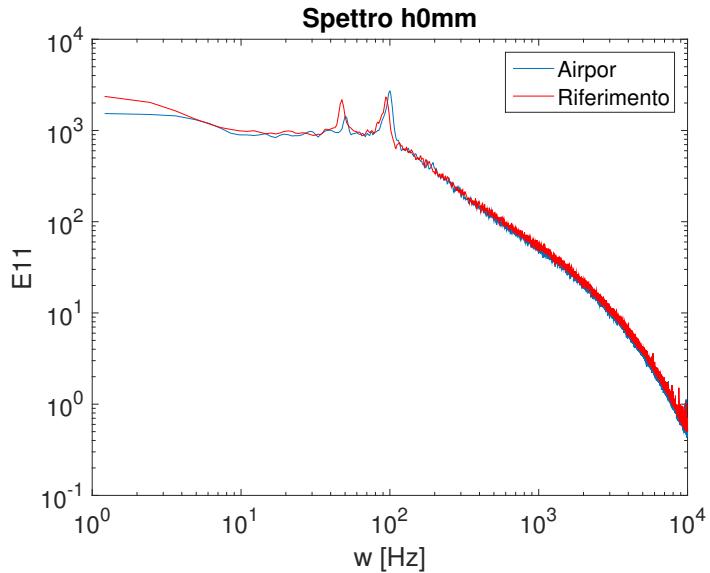


FIGURE 5.27: Spettro $h=0\text{mm}$ - 0.5 D

Per confermare questa assunzione è stata confrontata questa frequenza con quella relativa ad un cilindro che ha per diametro la dimensione trasversale del D-Shape e investito dalla stessa velocità del modello. La stima della frequenza per il cilindro è stata calcolata usando la relazione empirica 5.9

$$f_s = \frac{V \left(0.198 \left(1 - \frac{19.7}{Re} \right) \right)}{d} \quad (5.9)$$

con d pari a 6 cm , la dimensione trasversale del modello, il Re e la velocità cambiano ad ogni prova. Nella tabella 5.2 sono riportati la velocità, il numero di Reynolds e la frequenza di shedding stimata.

TABLE 5.2: Stima frequenza di shedding

Posizione	Provino	$v_{gall}[\text{m/s}]$	Re	$F[\text{Hz}]$
0.5 D	Riferimento	10.05	36244	33.14
0.5 D	Airpor	10.11	36461	33.34
2.0 D	Riferimento	10.13	36533	33.41
2.0 D	Airpor	10.14	36569	33.44
3.0 D	Riferimento	10.13	36533	33.41
3.0 D	Airpor	10.15	36605	33.47

Nella tabella 5.3 sono confrontate le due frequenze, si nota che la differenza tra le due è di una decina di Hz , uno scarto accettabile considerando il fatto che quella stimata è stata calcolato assumendo come geometria un cilindro e non quella del corpo tozzo in esame.

TABLE 5.3: Confronto frequenza misurata e stimata

Posizione	Provino	$F_{\text{stimata}}[\text{Hz}]$	$F_{\text{misurata}}[\text{Hz}]$
0.5 D	Riferimento	33.14	47.61
0.5 D	Airpor	33.34	50.05
2.0 D	Riferimento	33.41	47.61
2.0 D	Airpor	33.44	50.05
3.0 D	Riferimento	33.41	47.61
3.0 D	Airpor	33.47	50.05

Il secondo picco presente in alcuni spettri, risulta esattamente il doppio del primo, è quindi la prima armonica dovuta all'influenza delle due schiere di vortici che si separano. Si può verificare che spostandoci lontano dal piano di simmetria il secondo picco diminuisce la sua intensità fino a scomparire proprio perché a distanze più elevate il filo caldo non risente più della schiera di vortice che si stacca dallo spigolo inferiore del modello.

Osservando sempre la f_s si nota una leggera diminuzione dell'energia contenuta nelle basse frequenze, sempre nella zona limitrofa al modello che potrebbe avere come spiegazione sempre la capacità del materiale poroso di regolarizzare il flusso.

Come ultima osservazione si nota, confrontando i due modelli, che nel caso poroso si ha un piccolo spostamento di tale frequenza verso le frequenze più alte, probabilmente questo è dovuto ad delle leggere diversità della velocità di galleria, e quindi non imputabile alla presenza del materiale poroso.

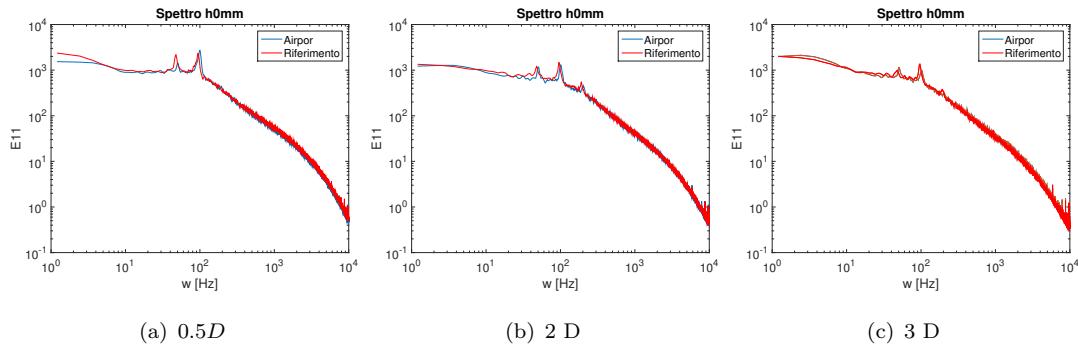


FIGURE 5.28: spettro 0

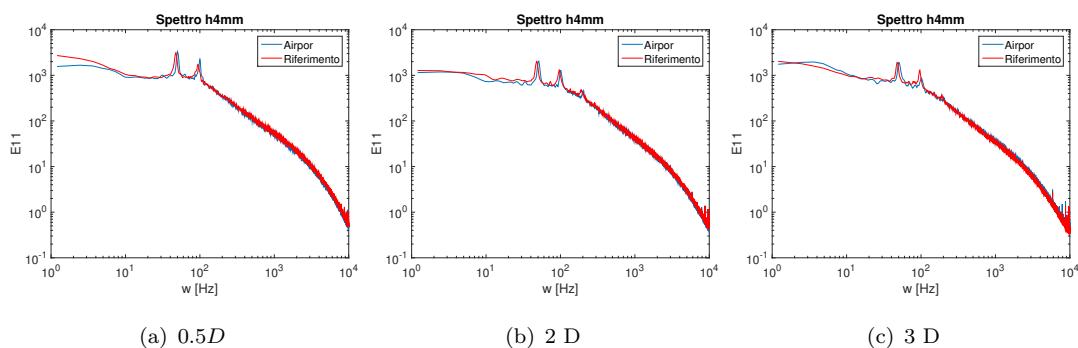


FIGURE 5.29: spettro 4

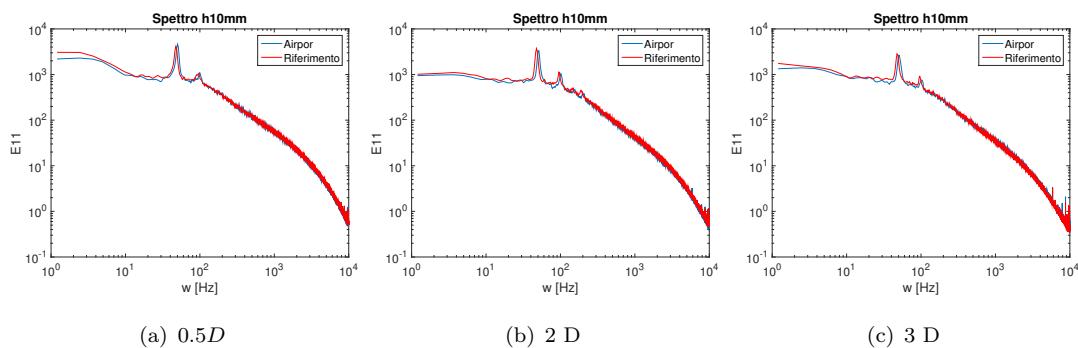


FIGURE 5.30: spettro 10

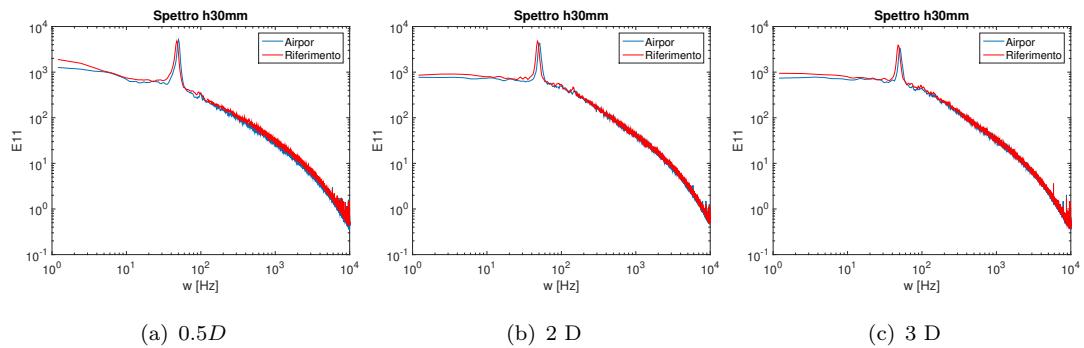


FIGURE 5.31: spettro 30

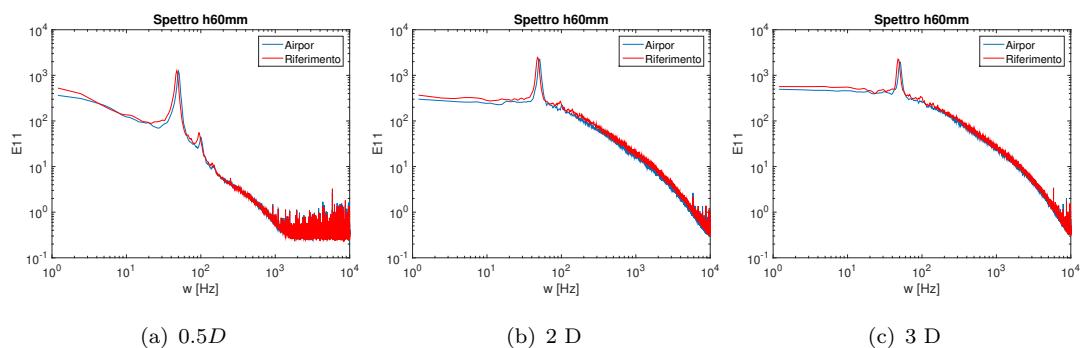


FIGURE 5.32: spettro 60

Per una visualizzazione complessiva delle varie misurazione i dati sono stati riorganizzati nelle fig. 5.33, 5.34 e fig. 5.35, dove viene visualizzato il contour degli spettri per tutti i punti di misurazione contemporaneamente. Da queste immagini è abbastanza semplice notare una striscia verticale con un valore molto più alto rispetto ai restanti punti, che corrisponde alla frequenza di shedding. Alle quote minori, e quindi più vicine al modello, si possono osservare i 2 fenomeni presentati in precedenza; ovvero la presenza della prima armonica della frequenza del rilascio dei vortici e la leggera diminuzione di energia in questa zona per il modello con gli inserti porosi.

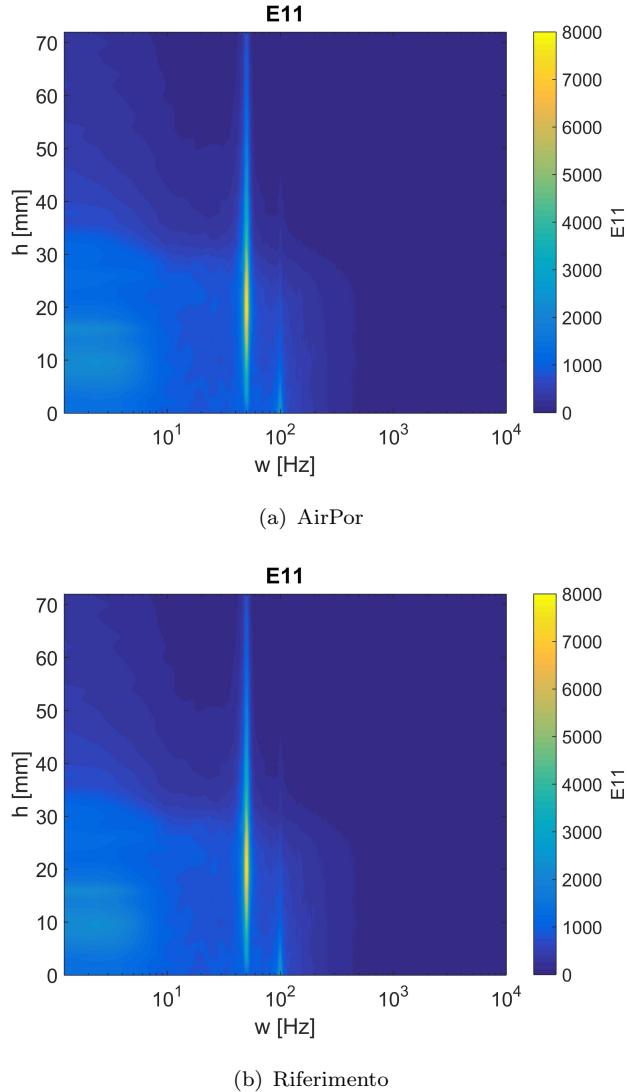


FIGURE 5.33: Contour spettro 0.5 D

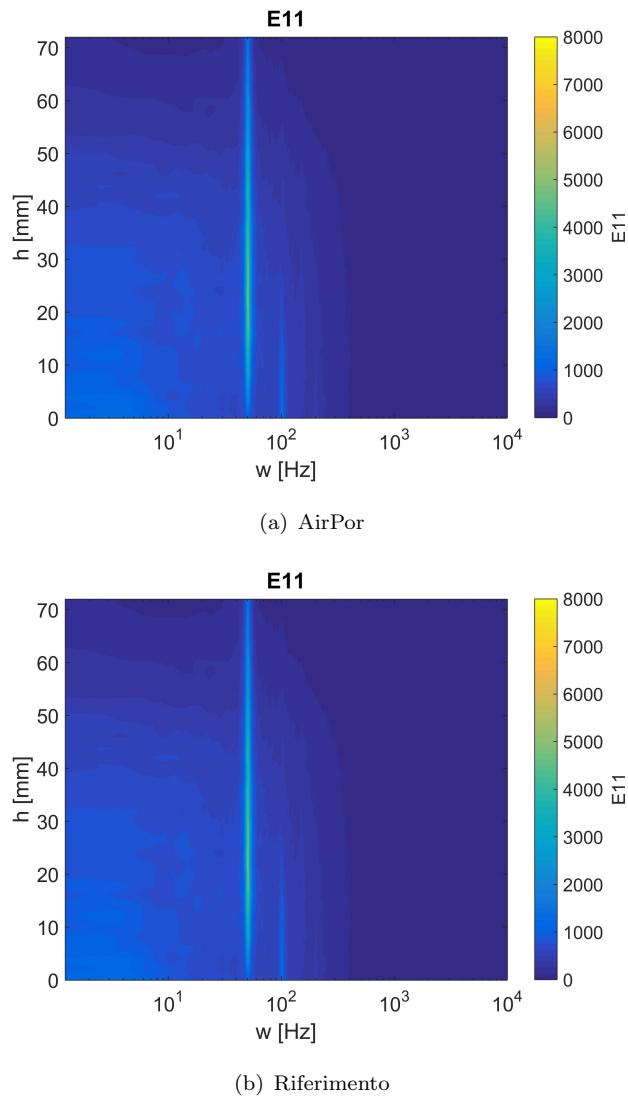


FIGURE 5.34: Contour spettro 2 D

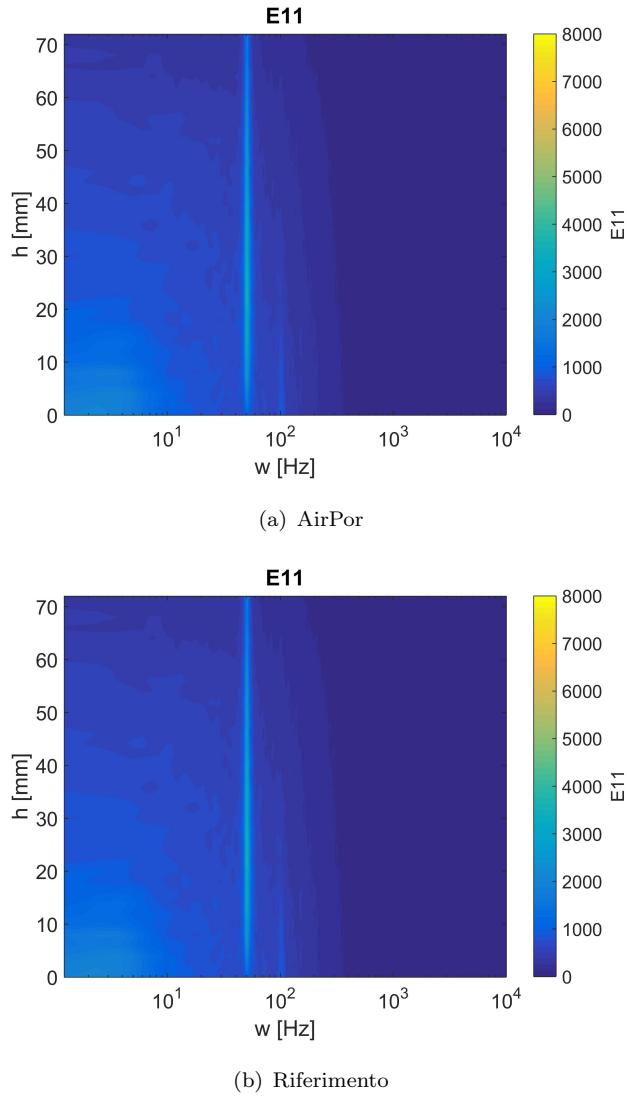


FIGURE 5.35: Contour spettro 3 D

Chapter 6

Conclusioni e sviluppi futuri

Questo studio aveva l'obbiettivo di indagare preliminarmente come il materiale poroso modifica la scia turbolenta e la separazione dietro a un corpo tozzo.

Terminate queste prove è possibile delineare alcune considerazioni. Come prima osservazione dobbiamo affermare che la prova ha avuto alcune difficoltà nel suo svolgimento dovute ad uno strumento, la galleria del vento del CLASD che non garantisce un ottima ripetibilità delle prove. Inoltre durante l'analisi dei dati sono state riscontrate alcune incongruenze che dovranno essere ricontrolate e confermate da successive prove e a cui non si è riusciti a dare una spiegazione razionale. Fatta questa premessa, si possono però trarre alcune informazioni utili per giungere delle conclusioni e soprattutto per capire come continuare questa prova con migliorie e possibili sviluppi futuri.

I risultati degni di nota sono stati riportati qui di seguito:

- Il materiale utilizzato è risultato molto interessante ed è un buon materiale per future prove. Dopo alcuni test con altri sue tipologie di materiale quali styrofoam e poliuretano espanso si è optato definitivamente per il materiale Airpor. Questa scelta è stata presa per 2 motivi principali, la sicurezza di avere una porosità abbastanza costante con delle celle aperte (non garantita, dagli altri due materiali) ed un'elevata permeabilità. Il secondo aspetto è quello della capacità di subire delle lavorazioni: Airpor si è dimostrato un materiale solido su cui è possibile eseguire delle lavorazioni, con strumenti come le fresa numeriche, con buona precisione.
- Dai profili medi della velocità si può concludere che gli inserti di materiale poroso può avere degli effetti positivi sul recupero della velocità in scia e quindi una riduzione dalla sua dimensione trasversale. Questa conclusione è in accordo con l'articolo di Yu et al del 2011 [13].

- Dalla correlazione dei segnali ottenuti con l'anemometro a filo caldo si nota un'autocorrelazione maggiore per il modello con l'inserto di Airpor rispetto a quello di riferimento che è possibile associarlo ad una regolarizzazione del flusso. Questo effetto si nota abbastanza bene nella zona più vicina al modello, mentre si perde allontanandosi dal modello stesso. Nella stessa zona si nota anche una riduzione dell'energia presente nella basse frequenze visibile nello spettro. A favore di questo si ha una diminuzione dell'intensità turbolenta presente nella scia generata dal modello con il materiale poroso.

Per gli sviluppi futuri si sono individuati alcuni parametri che non sono stati analizzati in queste prove ma che sicuramente hanno un'influenza non trascurabile per uno studio completo.

- studiare al cambiare del Reynolds come gli inserti porosi influiscono su diversi regimi di moto, spostandosi dalla situazione in cui lo shedding è un fenomeno così caratterizzante.
- studiare come influisce la porosità della materiale, in particolare cercando dei materiali con una porosità maggiore.
- studiare come varierebbero il risultati variando lo spessore dello strato poroso

Bibliography

- [1] H. Darcy - 1856. Les fontaines publiques de la ville de dijon. *Dalmont, Paris.*
- [2] Tilton - Cortelezzi - 2008. An experimentally inspired model of a wall transpiration actuator for boundary layer control. *J. Fluid Mech.*
- [3] S. Whitaker - 1969. Advances in theory of fluid motion in porous media. *Industrial and Engineering Chemistry.*
- [4] J. Bear - 1988. Dynamics of fluid in porous media. *Dover publications.*
- [5] O. Reynolds - 1883. An experimental investigation of the circumstances which determine whether the motion of water shall be direct or sinuous and the law of resistance in parallel channels. *Phil. Trans. R. Soc. 174:935–82.*
- [6] R. Garcia-Mayoral and J. Jiménez. Hydrodynamic stability and the breakdown of the viscous regime over ripples. *J. Fluid. Mech.,* 678:317–347, 2011.
- [7] T. Segawa, H. Mizunuma, K. Murakami, F-C. Li, and H. Yoshida. Turbulent drag reduction by means of alternating suction and blowing jets. *Fluid Dyn. Res.,* 39: 552–568, 2007.
- [8] P. H Forchheimer. Wasserbewegung durch boden. *Zeitsch-rift des Vereines Deutscher Ingenieure,* 49:1736–1749, 1901.
- [9] A. Berg - 2013. Numerical and experimental study of the fluid flow in porous medium in charging process of stratified thermal storage tank. *Master of Science Thesis.*
- [10] S. Whitaker - 1999. The method of volume averaging. *Springer Science+Business Media Dordrecht.*
- [11] Yu - et alt - 2010. Wake structure for flow past and through a porous square cylinder. *International Journal of Heat and Fluid Flow.*
- [12] Bruneau - Mortazavi - Gillieron - 2008. Flow Regularisation and Drag Reduction around Blunt Bodies Using Porous Devices. *J Fluids Eng.*

- [13] Yu - et alt - 2011. Steady flow around and through a permeable circular cylinder.
Comput. Fluids.