

Dipartimento di Ingegneria industriale

Corso di Laurea in
INGEGNERIA AEROSPAZIALE

Analisi e ottimizzazione di sistemi per la riduzione del livello di turbolenza in galleria del vento

Tesi di Laurea Triennale in
Aerodinamica

Relatore

Prof. Gabriele Bellani

Studente

Lorenzo Cesari

Correlatore

Alex Ravaioli

Sommario

Questo elaborato sperimentale si propone l'obiettivo di dimostrare l'efficacia dei manipolatori di flusso, quali reti e honeycomb, nella riduzione di turbolenza in galleria del vento.

La tesi è costituita da una parte teorica nella quale viene illustrato il funzionamento fisico alla base di tali dispositivi, citando articoli in letteratura che li vedono come protagonisti. Questa sezione sarà fondamentale per giustificare la scelta delle reti e il modo in cui verranno implementate.

Successivamente, nella seconda parte, verrà illustrato il set up sperimentale, caratterizzato da una descrizione della galleria del vento dove sono stati effettuati gli esperimenti, degli strumenti di misura e di quelli di analisi dei dati.

Nella terza parte verranno elencate le prove effettuate in laboratorio, prove scelte in modo da mettere in evidenza come varia il comportamento del flusso quando nella galleria sono presenti i manipolatori in diverse configurazioni e a diverse velocità del flusso stesso.

Infine verranno forniti e analizzati i dati ottenuti, i quali dimostreranno l'efficacia di reti e honeycomb.

Perciò, a seguito di tali risultati, reti e honeycomb verranno implementati nella galleria del vento in pianta stabile, in funzione delle necessità dell'operatore e del regime di velocità del flusso desiderato.

Indice

Elenco delle figure	3
Elenco delle tabelle	5
1 Trattazione teorica reti e honeycomb	7
1.1 Introduzione	7
1.2 Caratteristiche reti e honeycomb	7
1.3 Caratteristiche geometriche	7
1.4 Funzionamento delle reti	8
1.5 Riduzione della turbolenza	9
1.6 Honeycomb	10
1.7 Reti e honeycomb in serie	11
2 Setup sperimentale	12
2.1 Galleria del vento	12
2.2 Reti e honeycomb	13
2.3 Sistema di misurazione e calcolo	13
3 Prove	14
3.1 Introduzione	14
3.2 Prove con il convergente	14
3.3 Prove senza il convergente	15
4 Risultati	17
4.1 Introduzione	17
4.2 Prove con il convergente	17
4.3 Prove senza il convergente	20
4.4 Caso 0, confronto dimensionale	22
4.5 Confronto con i risultati teorici	23
5 Conclusioni	25
Bibliografia	27

Elenco delle figure

1.1	Caratteristiche geometriche rete.	8
1.2	Profilo di velocità nel passaggio attraverso una cella al variare della porosità e del coefficiente di perdita [7]. a) $\beta = 0.75$ e $K = 0.5$ b) $\beta = 0.53$ e $K = 2$ c) $\beta = 0.20$ e $K = 15$	8
1.3	Fattore di riduzione di turbolenza per vari tipi di reti, confronto tra risultati teorici e sperimentali. [6]	10
1.4	Fattori di riduzione di turbolenza, confronto tra l'effetto di più reti in serie e l'effetto della combinazione tra honeycomb e rete. [6].	10
1.5	Fattore di riduzione di turbolenza per varie combinazioni di reti in serie, confronto tra risultati teorici e sperimentali. [6].	11
2.1	Esplosione della galleria del vento, da sinistra a destra: <i>case</i> della ventola, diffusore, camera di calma, convergente.	12
2.2	Da sinistra a destra: Rete a maglia larga, rete a maglia fine, honeycomb.	13
3.1	Prova h	14
3.2	Prova h+R e prova h+r	15
3.3	Prova h+R+r	15
3.4	Prova h_pre	16
3.5	Prova R_pre	16
4.1	Spettro di densità energetica $Re \simeq 5500$	18
4.2	Spettro di densità energetica $Re \simeq 11000$	19
4.3	Spettro di densità energetica $Re \simeq 22000$	19
4.4	Spettro di densità energetica $Re \simeq 3500$	21
4.5	Spettro di densità energetica $Re \simeq 6000$	21
4.6	Spettro di densità energetica $Re \simeq 12000$	22
4.7	Confronto dei tre casi, prova 0	22

Elenco delle tabelle

4.1	Livello di turbolenza e coefficiente di riduzione di turbolenza con convergente.	17
4.2	Livello di turbolenza e coefficiente di riduzione di turbolenza senza convergente.	20
4.3	<i>Prova r^*</i> , confronto tra dati teorici e sperimentali.	23
4.4	<i>Prova R^*</i> , confronto tra dati teorici e sperimentali.	24

Capitolo 1

Trattazione teorica reti e honeycomb

1.1 Introduzione

Al fine di ottenere un flusso più laminare possibile, nelle gallerie del vento vengono spesso posti a monte della sezione di test dei cosiddetti manipolatori di flusso come reti, honeycomb o lamine perforate. Questi oggetti permettono non solo di ridurre i vortici nel flusso d'aria ma anche di uniformarne la velocità lungo tutta la sezione.

1.2 Caratteristiche reti e honeycomb

Le reti da sole riducono la turbolenza assiale di più rispetto a quella laterale, mentre viceversa gli honeycombs da soli riducono la seconda più della prima. Per questo motivo, inserendo con l'honeycomb una o più reti, otteniamo una combinazione perfetta per la riduzione di turbolenza. Alcuni esperimenti hanno dimostrato che si ottiene una maggiore efficacia ponendo l'honeycomb a monte delle reti [4].

Poiché le reti riducono la turbolenza assiale di più di quella laterale, se il flusso a monte della rete è isotropico, non lo sarà a valle. È necessario tener conto di questa evidenza qualora si volessero combinare più reti assieme.

Naturalmente l'interazione del flusso con la rete è estremamente complessa e perciò le varie considerazioni teoriche saranno di natura puramente approssimativa.

1.3 Caratteristiche geometriche

Le reti sono caratterizzate dallo spessore dei fili (d) e dal numero di maglia (M) ovvero dalla distanza tra due fili adiacenti, come in figura 1.1.

Da questi valori è possibile ricavare la porosità β , ovvero il rapporto tra la superficie libera e quella totale della rete:

$$\beta = \left(1 - \frac{d}{M}\right)^2 \quad (1.1)$$

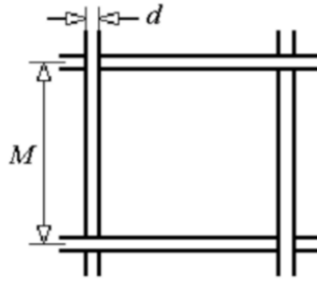


Figura 1.1: Caratteristiche geometriche rete.

Per valori troppo bassi di porosità ($\beta < 0.58$) si verifica un fenomeno detto *overshoot*, condizione instabile per la quale si ottiene un profilo di velocità a "campana rovesciata".

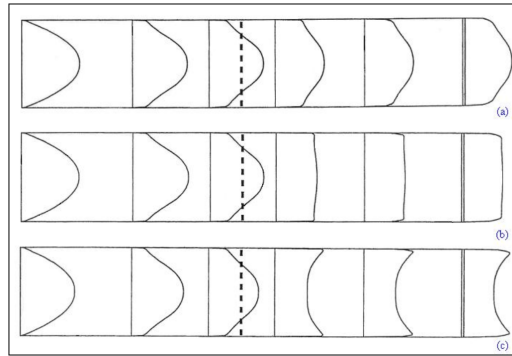


Figura 1.2: Profilo di velocità nel passaggio attraverso una cella al variare della porosità e del coefficiente di perdita [7].

- a) $\beta = 0.75$ e $K = 0.5$
- b) $\beta = 0.53$ e $K = 2$
- c) $\beta = 0.20$ e $K = 15$.

I parametri d e M vengono utilizzati anche nell'honeycomb ma poiché solitamente i pori dell'honeycomb sono esagonali, il numero di maglia indica il diametro idraulico di un singolo poro. Tipicamente l'honeycomb è caratterizzato da uno spessore 6-8 volte il suo numero di maglia [1].

1.4 Funzionamento delle reti

Il primo a studiare gli effetti delle reti in una galleria del vento fu Prandtl [5], il quale scoprì che queste erano in grado di diminuire le fluttuazioni della velocità sia laterale che longitudinale del flusso, rendendolo così più omogeneo e di conseguenza laminare. Tale capacità deriva dalla resistenza generata tra rete e fluido, la quale è proporzionale al quadrato della velocità del flusso stesso. Poiché la caduta di

pressione è la stessa lungo tutta la superficie della rete, le particelle fluide più veloci tenderanno ad espandersi, rallentando, mentre viceversa quelle più lente tenderanno a comprimersi, accelerando. Perciò le varie velocità di tutte le particelle convergeranno a un certo valore, pari alla velocità media del flusso.

1.5 Riduzione della turbolenza

Prandtl definisce il coefficiente di riduzione della turbolenza f :

$$f_u = \frac{(u'/U)_2}{(u'/U)_1} \quad (1.2)$$

$$f_v = \frac{(v'/U)_2}{(v'/U)_1} \quad (1.3)$$

dove il pedice 1 indica che la misura è stata fatta a monte della rete mentre il pedice 2 indica che la misura è avvenuta a valle.

I rapporti u'/U e v'/U indicano il livello di turbolenza rispettivamente assiale e radiale del flusso, con u' e v' *root mean square* delle fluttuazioni delle componenti del vettore velocità e U velocità media del flusso.

In parole povere con $f = 0.4$ abbiamo una riduzione della turbolenza del 60%.

I coefficienti f_u e f_v possono essere interpretati rispettivamente come la tendenza del flusso ad uniformarsi in velocità e la tendenza del flusso ad uniformarsi in direzione.

È possibile calcolarli con i modelli empirici di Prandtl (formula 1.4) e Dryden-Schubauer (formula 1.5):

$$f_u = \frac{1}{1 + K} \quad (1.4)$$

$$f_v = \frac{1}{\sqrt{1 + K}} \quad (1.5)$$

dove K è il coefficiente adimensionale delle perdite definito come:

$$K = \frac{\Delta p}{q} \quad (1.6)$$

con Δp caduta di pressione statica e $q = \rho U^2/2$ pressione dinamica.

Come si può osservare in entrambe le formule, maggiore è il K maggiore sarà l'efficacia delle reti, prestando però attenzione al limite imposto dal fenomeno dell'*overshoot*.

L'equazione di Laws-Livesey [2] ci permette di calcolare il coefficiente delle perdite per una rete:

$$K_r = A \left(\frac{1}{\beta_r^2} - 1 \right) \quad (1.7)$$

con A , per reti a fili circolari:

$$A = \begin{cases} \frac{14}{Re_d}, & \text{per } Re_d \leq 10 \\ 0.52 + \frac{66}{Re_d^{4/3}}, & \text{per } 40 \leq Re_d \leq 10^5 \end{cases} \quad (1.8)$$

dove β_r è la porosità della rete mentre Re_d è il numero di Reynolds riferito al diametro dei fili.

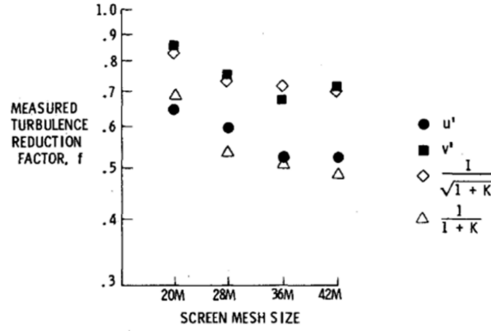


Figura 1.3: Fattore di riduzione di turbolenza per vari tipi di reti, confronto tra risultati teorici e sperimentali. [6]

1.6 Honeycomb

Tutte le considerazioni fatte sopra sono valide anche per l'honeycomb con la differenza sostanziale che quest'ultimo riduce molto più la turbolenza radiale rispetto a quella assiale.

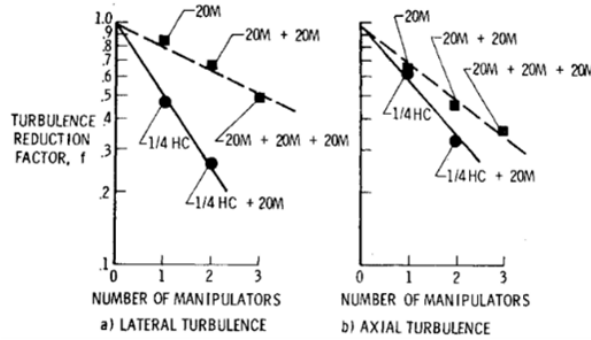


Figura 1.4: Fattori di riduzione di turbolenza, confronto tra l'effetto di più reti in serie e l'effetto della combinazione tra honeycomb e rete. [6].

Come si può osservare dalla figura 1.4 la riduzione di turbolenza sia assiale che radiale è più alta nella combinazione di honeycomb-rete rispetto all'impiego di tre reti in serie.

Il coefficiente adimensionale delle perdite dell'honeycomb può essere calcolato dalla seguente formula [1]:

$$K_h = \lambda_h \left(\frac{L_h}{D_h} + 3 \right) \left(\frac{1}{\beta_h} \right)^2 + \left(\frac{1}{\beta_h} - 1 \right)^2 \quad (1.9)$$

con L_h spessore dell'honeycomb, D_h diametro idraulico dei fori esagonali e β_h porosità dell'honeycomb. λ_h invece si calcola:

$$\lambda_h = \begin{cases} 0.375 \left(\frac{d_h}{D_h} \right)^{0.4} Re_d^{0.1} & \text{per } Re_d \leq 275 \\ 0.214 \left(\frac{d_h}{D_h} \right)^{0.4} & \text{per } Re_d > 275 \end{cases} \quad (1.10)$$

con d_h spessore dei bordi dei fori e Re_d numero di Reynolds riferito allo spessore stesso.

1.7 Reti e honeycomb in serie

Per diminuire ulteriormente la turbolenza è possibile porre in serie più elementi. Mentre il coefficiente delle perdite di pressione complessivo sarà la sommatoria dei coefficienti delle perdite di ciascuna rete, il coefficiente di riduzione di turbolenza totale è pari alla produttoria (figura 1.5). Di conseguenza, a parità di perdite totali, conviene l'impiego di più reti.

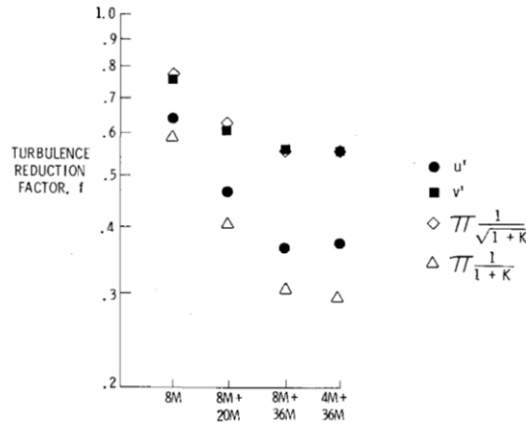


Figura 1.5: Fattore di riduzione di turbolenza per varie combinazioni di reti in serie, confronto tra risultati teorici e sperimentali. [6].

Per mettere in serie un certo numero di reti è necessario tener conto dei vortici che si generano a valle dopo che il flusso ne attraversa una. Questi vortici, infatti, potrebbero compromettere l'efficacia della rete successiva.

Per evitare ciò basta porre ogni rete a una certa distanza dalla precedente tale da lasciare spazio ai vortici generati da quest'ultima di dissiparsi. La distanza tra una rete e l'altra è consigliata essere 20-30 volte il numero di maglia della precedente. Anche l'honeycomb genera dei vortici, seppur di intensità inferiore. Perciò lo spazio indicato per permettere a questi vortici di dissiparsi è 0.2 – 0.3 volte il diametro della sezione del condotto.

Capitolo 2

Setup sperimentale

2.1 Galleria del vento

Gli esperimenti sono stati realizzati presso il laboratorio CICLoPE su una galleria del vento di tipo blower a ciclo aperto. Tale galleria, disegnata e assemblata da Alex Ravaoli, è stata pensata per alimentare un cast polmonare al fine di analizzare il comportamento del flusso d'aria nelle vie respiratorie profonde.

La galleria (figura 2.1) è alimentata da una ventola a potenza variabile (tensione massima di alimentazione: 12 V) e costituita da un diffusore che rallenta il flusso d'aria, una camera di calma che contribuisce alla dissipazione dei vortici più grandi e infine un convergente per accelerare il flusso. Tutte queste componenti sono tenute assieme da 4 barre filettate poste in corrispondenza dei vertici, fissate con bulloni M4.

La galleria è modulare e ciò ci permette di poter ottenere facilmente diversi tipi di configurazioni, come vedremo nel prossimo capitolo.

La galleria si estende per circa 80 cm in lunghezza (variabile in base alla configurazione) e ha un diametro massimo di 12 cm.

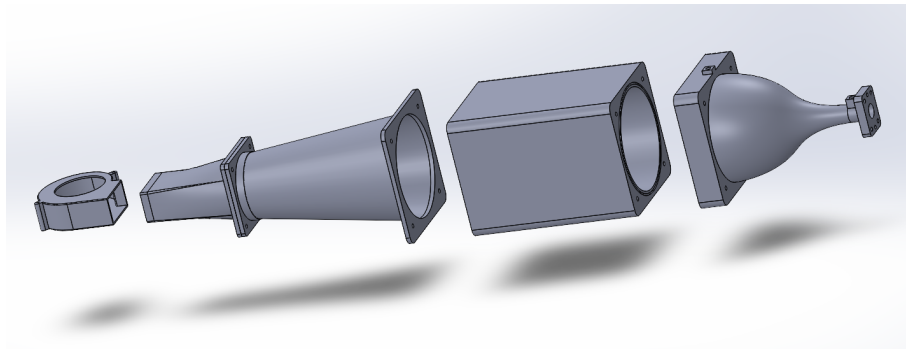


Figura 2.1: Esploso della galleria del vento, da sinistra a destra: *case* della ventola, diffusore, camera di calma, convergente.

2.2 Reti e honeycomb

Per questi esperimenti sono stati scelti due diverse tipologie di reti, una a maglia larga ($d = 0.5 \text{ mm}$, $M = 5.5 \text{ mm}$, $\beta = 0.83$) e una a maglia stretta ($d = 0.2 \text{ mm}$, $M = 1.4 \text{ mm}$, $\beta = 0.73$), entrambe con valori di porosità β in linea con quanto detto nella sezione 1.3. Queste due tipologie sono state scelte in modo da ottenere un confronto e dedurre quale sia la più utile ai nostri fini.

L'honeycomb invece è costituito da un pattern di fori esagonali ($D_h = 0.6 \text{ cm}$, $d_h = 0.8 \text{ mm}$, $\beta_h = 0.72$) e da uno spessore $L_h = 3.6 \text{ cm}$ (pari a 6 volte il diametro idraulico, come visto nella sezione 1.3).

A differenza delle reti l'honeycomb era già presente nella galleria del vento, anche se non ne era mai stata dimostrata l'efficacia.

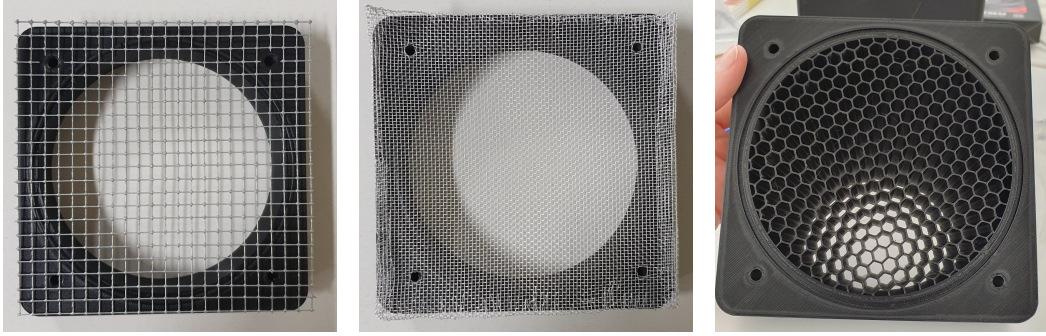


Figura 2.2: Da sinistra a destra: Rete a maglia larga, rete a maglia fine, honeycomb.

2.3 Sistema di misurazione e calcolo

Per le misure relative alla velocità è stato utilizzato un anemometro a filo caldo posto a valle della galleria del vento, nello specifico un anemometro platino-rodio di lunghezza 0.5 mm e spessore di $2.5 \mu\text{m}$. Lo strumento è stato orientato in modo da misurare i valori di velocità longitudinale.

Gli anemometri non forniscono direttamente il valore di velocità ma misurano la caduta di tensione sul filo. La conversione da tensione a velocità viene eseguita digitalmente tramite l'uso di una curva di calibrazione. Tale curva è ricavata dalla legge di King modificata, che permette una misura accurata anche alle basse velocità [3]:

$$U = k_1(E^2 - E_0^2)^{1/n} + k_2(E - E_0)^{0.5} \quad (2.1)$$

Una volta ottenuti tutti i dati relativi alla velocità sarà possibile calcolare il livello di turbolenza e di conseguenza il fattore di riduzione di turbolenza (formula 1.2).

Per un'analisi più approfondita verrà invece implementato per ciascuna prova uno spettro di densità energetica al quale è stato applicato un filtro passa-alto con frequenza di taglio $f = 5 \text{ Hz}$ per eliminare gli errori causati dal *drift* dell'anemometro e da altre oscillazioni a bassa frequenza non legate alla qualità del flusso in uscita dal convergente.

Capitolo 3

Prove

3.1 Introduzione

La fase sperimentale consiste nell'acquisizione di informazioni con l'anemometro di diverse configurazioni della galleria del vento. Per ciascuna configurazione sono state fatte tre prove, ciascuna con numero di giri della ventola diverso in modo da poter apprezzare eventuali differenze nei risultati tra diverse velocità. Nello specifico la ventola è stata alimentata nel primo caso da una tensione di 3.8V, e negli altri due casi da tensioni di 4.2V e 7.8V, valori scelti in modo da ottenere in output velocità rispettivamente doppie e quadruple alla prima.

Poiché il convergente fornisce anch'esso un contributo nella riduzione di turbolenza, si è pensato di fare una serie di prove con e una serie di prove senza di esso per poter apprezzare al meglio l'efficacia o meno di honeycomb e reti.

Di seguito l'elenco delle prove effettuate.

3.2 Prove con il convergente

- Prova 0: Configurazione senza alcun tipo di manipolatori di flusso. Questa prova è necessaria come riferimento.
- Prova h: Configurazione con honeycomb. L'honeycomb è stato inserito tra la camera di calma e il convergente (figura 3.1).

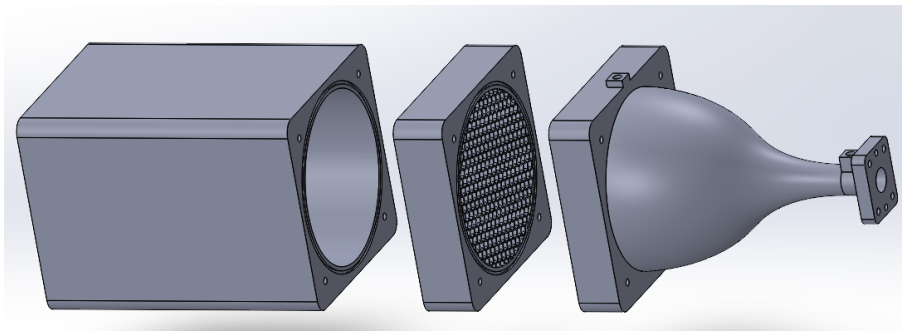


Figura 3.1: Prova h

- Prova h+R: Configurazione con honeycomb e rete a maglia larga (R). Per implementare la rete è stata inserita una porzione di condotto lunga 3 cm per permettere ai vortici generati dalla rete di dissiparsi (figura 3.2).
- Prova h+r: Configurazione con honeycomb e rete a maglia fine (r) (figura 3.2).

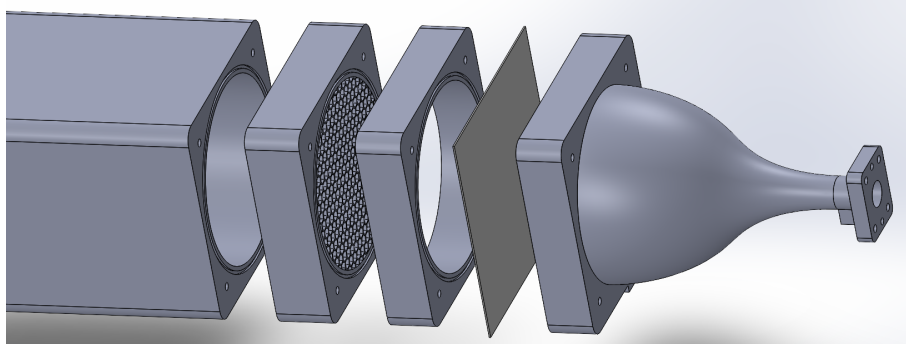


Figura 3.2: Prova h+R e prova h+r

- Prova h+R+r: Configurazione con entrambe le reti (maglia larga e maglia fine). Come suggerito in letteratura (sezione 1.7) le reti sono state poste in ordine decrescente di numero di maglia e distanziate tra di loro con un'ulteriore porzione lunga 3 cm di camera di calma (figura 3.3).

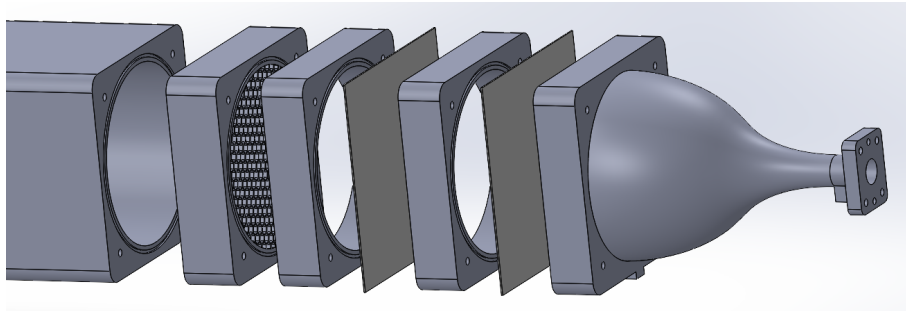


Figura 3.3: Prova h+R+r

3.3 Prove senza il convergente

- Prova 0*: Come prova 0 ma senza convergente.
- Prova h*: Come prova h ma senza convergente.
- Prova R*: Configurazione con solo rete a maglia larga, senza convergente.
- Prova r*: Configurazione con solo rete a maglia fine, senza convergente.
- Prova h_pre: Configurazione con solo honeycomb a monte (figura 3.4).

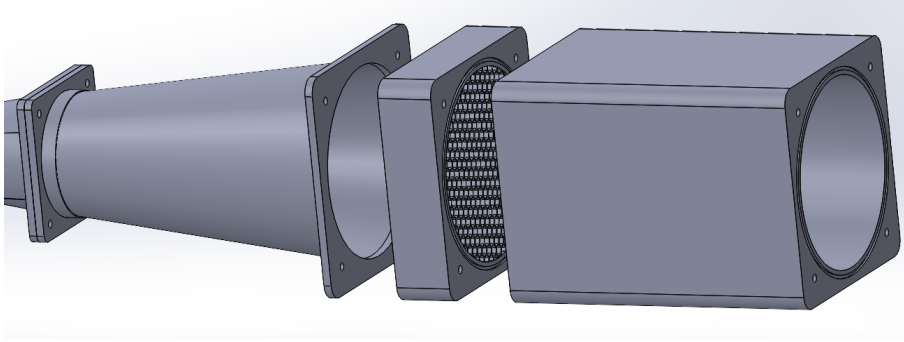


Figura 3.4: Prova h_{pre}

- Prova R_{pre} : Configurazione con solo rete a maglia larga a monte (figura 3.5).

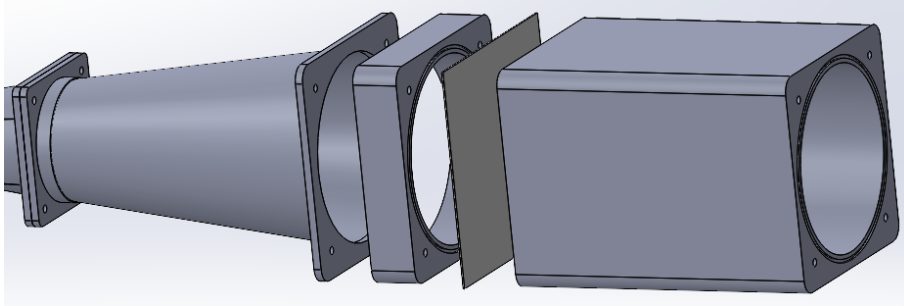


Figura 3.5: Prova R_{pre}

Queste ultime 2 prove sono state implementate poiché, mentre nelle prove col convergente i vortici generati da reti e honeycomb avevano lo spazio sufficiente per dissiparsi, in questo caso si aveva il timore che lo spazio a valle non fosse abbastanza (sezione 1.7).

Per ciascuna prova sono stati raccolti dati per una durata di 30 secondi dopo la fine del transitorio causato dai cambi di regime di rotazione della ventola, con una frequenza di campionamento pari a 30 kHz e filtro passa-basso a 10 kHz .

Capitolo 4

Risultati

4.1 Introduzione

Di seguito vengono mostrati i risultati degli esperimenti, mettendo a confronto le prove con le stesse condizioni di alimentazione e la stessa sezione di output per un totale di 6 confronti.

Per ciascuna comparazione viene fornito un numero di Reynolds (Re) di riferimento, tenendo conto che la velocità media del flusso in uscita sarà diversa tra le varie prove a causa delle perdite introdotte da reti e honeycomb.

I fattori maggiormente tenuti in considerazione saranno il livello di turbolenza (formula 4.1), il coefficiente di riduzione di turbolenza (formula 1.2) e gli spettri di densità energetica.

$$LT = \frac{\sigma}{U_{mean}} \quad (4.1)$$

con σ deviazione standard di U e U_{mean} velocità media del flusso.

4.2 Prove con il convergente

	Re $\simeq$ 5500		Re $\simeq$ 11000		Re $\simeq$ 22000	
	LT [%]	f [%]	LT [%]	f [%]	LT [%]	f [%]
Prova 0	0.41	100.00	0.75	100.00	0.98	100.00
Prova h	0.38	92.70	0.79	104.62	0.89	91.50
Prova h+R	0.32	77.80	0.53	69.69	0.72	73.27
Prova h+r	0.35	85.57	0.46	61.32	0.73	74.39
Prova h+R+r	0.31	76.14	0.46	60.87	0.75	77.07

Tabella 4.1: Livello di turbolenza e coefficiente di riduzione di turbolenza con convergente.

Dalla tabella 4.1 si può osservare in maniera immediata l'efficacia di reti e honeycomb come riduttori di turbolenza. I dati relativi all'honeycomb però non rispecchiano i risultati attesi sia perché in generale ci si aspettava una riduzione di

turbolenza più accentuata, sia perché nel caso $Re \simeq 11000$ abbiamo addirittura un aumento del livello di turbolenza. Probabilmente tali risultati sono stati falsati da uno scorretto set up di misura. Tale ipotesi è supportata anche dal fatto che il numero di Reynolds in uscita nella configurazione con l'honeycomb sia maggiore rispetto alla configurazione senza, risultato impossibile dato che la presenza dell'honeycomb introduce delle perdite.

Per un'analisi più approfondita risulta interessante analizzare gli spettri di densità energetica per comprendere meglio quali frequenze vengono maggiormente interessate dalla presenza dei manipolatori di flusso. Per un confronto più preciso le variabili degli assi cartesiani sono state adimensionalizzate (la frequenza con il numero di Strouhal $St = D \cdot f / U_b$ e l'energia normalizzando per U_b^2)

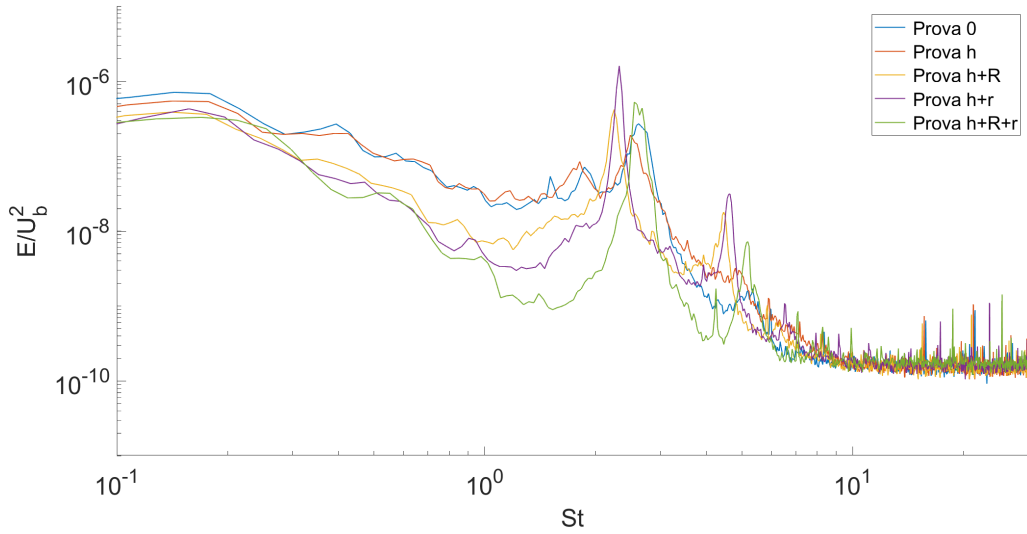


Figura 4.1: Spettro di densità energetica $Re \simeq 5500$.

In figura 4.1 si può osservare alle basse e medie frequenze una generale tendenza a raggiungere livelli di energia più bassi man mano che aumentano le perdite concentrate introdotte da reti e honeycomb. Infatti il livello più basso è raggiunto dalla configurazione con l'honeycomb ed entrambe le reti.

Purtroppo nessuna configurazione è riuscita ad eliminare il picco a $St \simeq 2$.

Come visto nella teoria la presenza delle reti genera dei vortici che hanno bisogno di spazio per essere dissipati (sezione 1.7). Essendo in questo caso la velocità del flusso molto bassa, i vortici generati dalla reti sono piuttosto grandi e probabilmente, come si può evincere dal secondo picco ($St \simeq 4$), non sono riusciti a dissolversi del tutto. Alle stesse frequenze infatti nella prova 0 non c'è alcun picco.

In figura 4.2 invece si può osservare come la presenza della reti abbia abbattuto il picco a $St \simeq 0.6 - 1.0$.

A differenza del primo caso non si notano particolari differenze tra l'andamento delle tre prove con le reti anche se la *prova h+r* è quella con i risultati migliori.

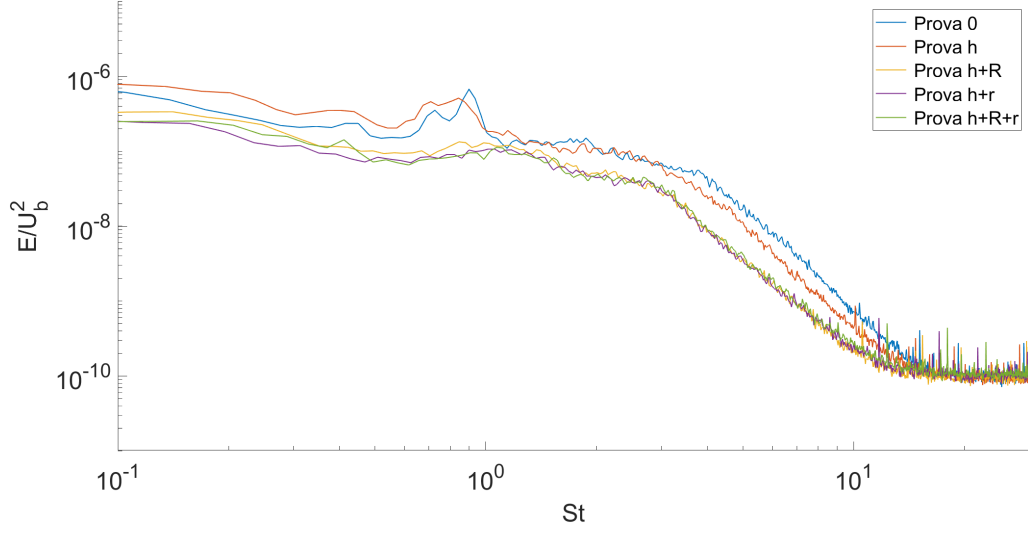


Figura 4.2: Spettro di densità energetica $Re \simeq 11000$.

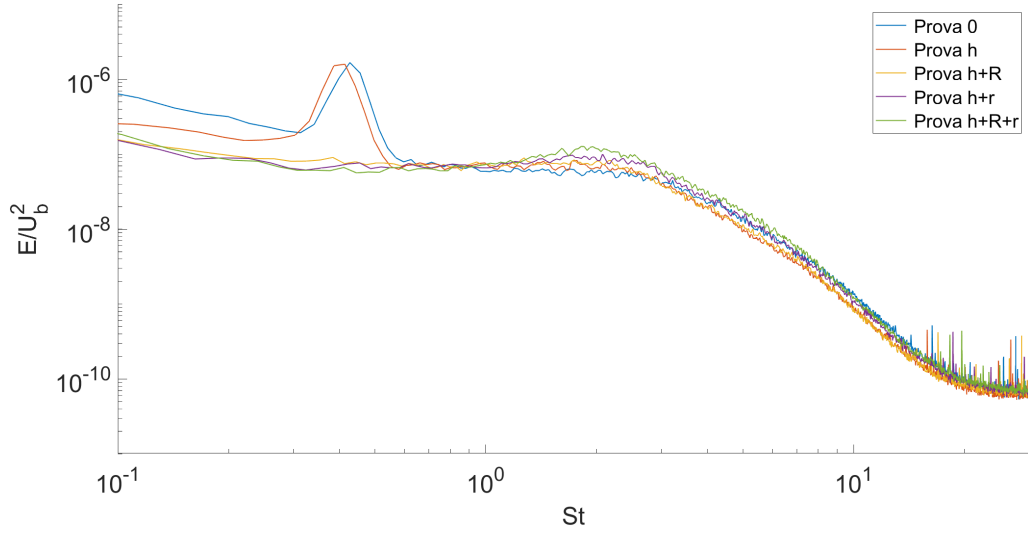


Figura 4.3: Spettro di densità energetica $Re \simeq 22000$.

Come nel caso precedente anche nella figura 4.3 abbiamo un evidente abbattimento di un picco ($St \simeq 0.3 - 0.5$).

Come già detto l'honeycomb riduce la turbolenza direzionale di più di quanto non faccia con quella longitudinale (sezione 1.2) e ciò giustifica il motivo per cui negli ultimi due casi il primo picco è presente anche nella *prova h*. Infatti nei nostri esperimenti ci siamo limitati alla sola misura della velocità longitudinale sulla quale l'honeycomb ha una influenza minore rispetto alle reti.

4.3 Prove senza il convergente

	Re $\simeq$ 3500		Re $\simeq$ 6000		Re $\simeq$ 12000	
	LT [%]	f [%]	LT [%]	f [%]	LT [%]	f [%]
Prova 0*	4.52	100.00	15.63	100.00	28.90	100.00
Prova h*	2.95	65.40	13.85	88.57	19.98	69.11
Prova R*	5.47	121.08	14.30	91.44	26.01	89.98
Prova r*	4.31	95.48	10.64	68.04	21.41	74.09
Prova h-pre	6.63	146.88	13.54	86.59	25.23	87.29
Prova R-pre	8.25	182.53	16.89	108.04	26.33	91.09

Tabella 4.2: Livello di turbolenza e coefficiente di riduzione di turbolenza senza convergente.

Dalla tabella 4.2 si possono osservare risultati molto diversi da quelli dei primi esperimenti.

Nella *prova R** per esempio osserviamo una poca efficacia delle reti o persino un aumento di turbolenza a basse velocità. Ciò è giustificato dal poco spazio a disposizione dei vortici generati dalla rete per dissiparsi. Secondo la teoria (1.7) infatti è necessario uno spazio di circa 20 – 30 volte il numero di maglia cioè in questo caso 12 *cm* – 18 *cm*, molto maggiore di quello effettivo.

Si può al contrario osservare che la rete a maglia fine e l'honeycomb lavorino piuttosto bene. Questo appunto perché lo spazio da loro richiesto è molto inferiore (circa 4 *cm* – 6 *cm* per la rete e 2.4 *cm* – 3.6 *cm* per l'honeycomb).

Le ultime due prove, come detto, avevano l'obiettivo di eliminare il problema dei vortici generati dai manipolatori di flusso. Queste due configurazioni sono però risultate inefficaci poiché i vortici generati dalla ventola e dal distacco di vena nel diffusore hanno bisogno di una camera di calma per dissiparsi. Quello che accade perciò è che un flusso già turbolento passa attraverso dei manipolatori di flusso che generano ulteriore turbolenza. La camera di calma non è sufficiente per dissipare tale turbolenza e perciò in uscita abbiamo un flusso peggiore di quello della *prova 0**.

Questi risultati mettono perciò in evidenza l'importanza della camera di calma nella riduzione di turbolenza e la necessità di porla a monte dei manipolatori di flusso.

Come si può osservare dagli spettri energetici, a basse velocità (figura 4.4) il dispositivo che sembra funzionare meglio è l'honeycomb. Gli altri portano persino ad un aumento di energia a certe frequenze.

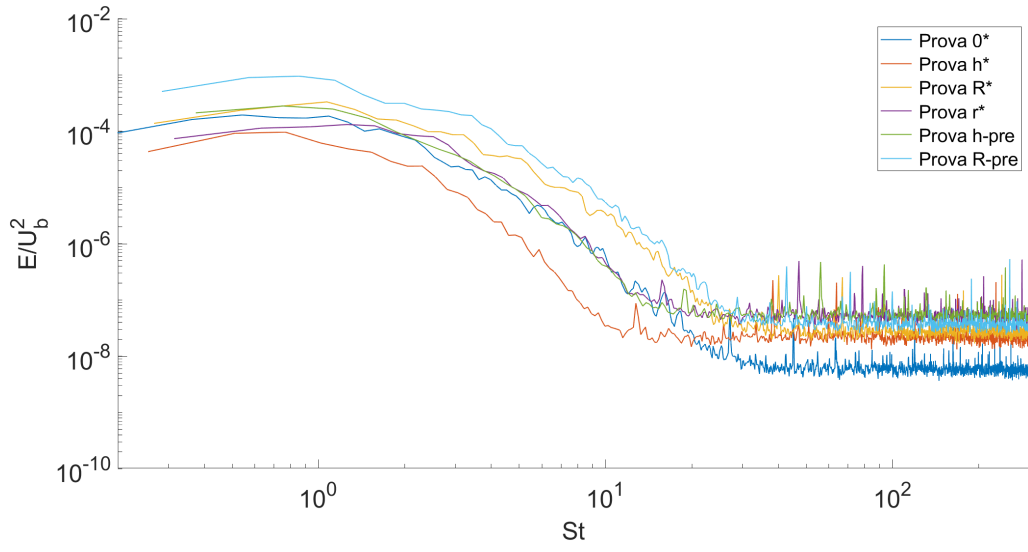


Figura 4.4: Spettro di densità energetica $Re \simeq 3500$.

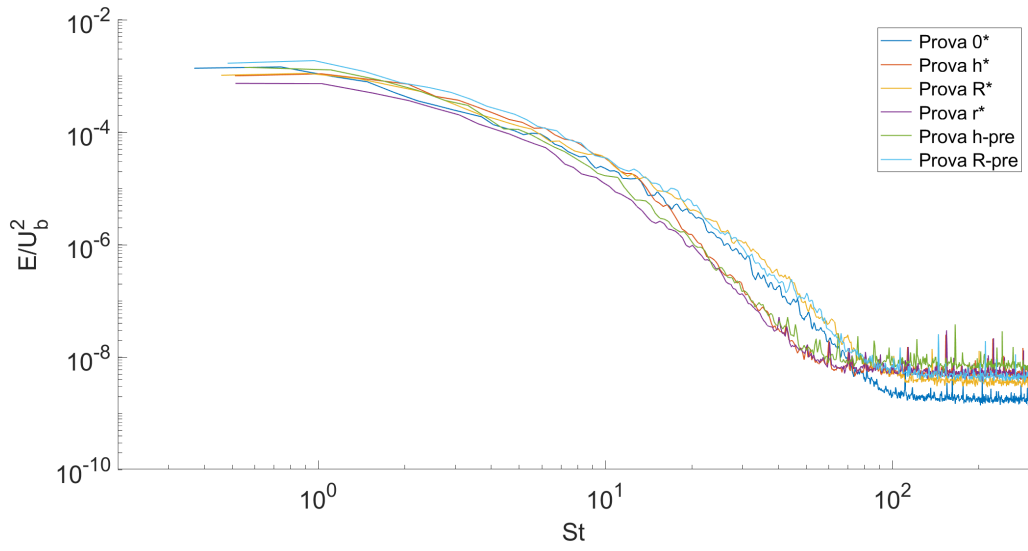


Figura 4.5: Spettro di densità energetica $Re \simeq 6000$.

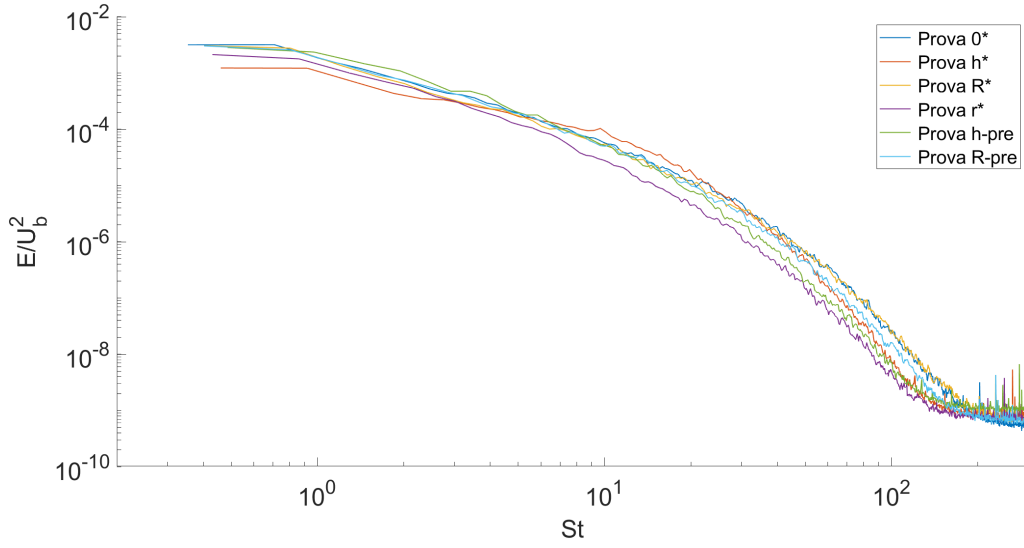


Figura 4.6: Spettro di densità energetica $Re \simeq 12000$.

A velocità medio-alte (figure 4.5 e figura 4.6) invece il comportamento migliore sembrano avercelo le reti a maglia fine per i motivi sopra elencati. Inoltre si può osservare come all'aumentare della velocità le configurazioni con rete e honeycomb a monte della camera di calma creino meno problemi. Questo perché a velocità più elevate il flusso risente meno del distacco di vena del divergente.

4.4 Caso 0, confronto dimensionale

Per analizzare la natura del picco di energia osservato in configurazione senza reti, si sono implementati spettri dimensionali (figura 4.7).

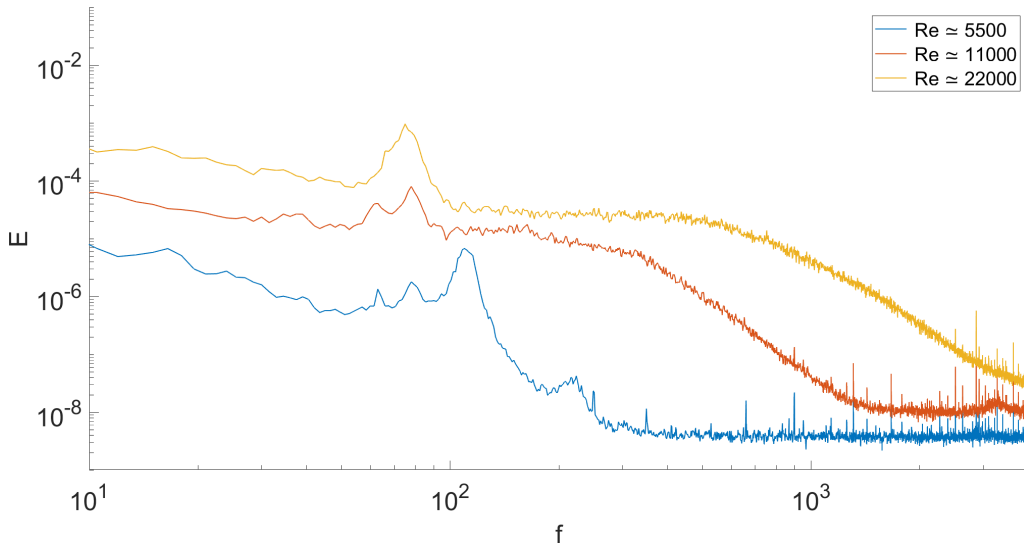


Figura 4.7: Confronto dei tre casi, prova 0

Come si può osservare il picco a $f = 70 - 90 \text{ Hz}$ è presente in tutte e tre le curve e perciò si può concludere che tale picco non dipenda dal numero di Reynolds.

4.5 Confronto con i risultati teorici

Le prove senza il convergente ci permettono di poter mettere a confronto i risultati teorici esposti nel capitolo 1, con i risultati ottenuti in laboratorio.

K_{teor} è stato ricavato dalla formula 1.7 mentre il K_{dati} è stato calcolato partendo dalla formula 1.6, considerando come Δp la caduta di pressione dinamica tra la prova presa in esame e quella senza manipolatori di flusso, a parità di tensione, ipotizzando quindi che la caduta di pressione sia dovuta esclusivamente alle perdite introdotte dalla rete.

A questo punto, utilizzando l'equazione di Bernoulli per un fluido incomprimibile:

$$p + \rho \frac{U^2}{2} = cost. \quad (4.2)$$

si ottiene, dalla formula 1.6:

$$K_{dati} = \left(\frac{U_0}{U} \right)^2 - 1 \quad (4.3)$$

dove U_o e U sono le velocità medie del flusso in output, rispettivamente della prova 0^* e della prova in esame.

Per quanto riguarda invece il fattore di riduzione di turbolenza, $f_{prandtl}$ è stato calcolato partendo dalla formula 1.4 (modello di Prandtl), considerando $K = K_{dati}$, mentre f_{exp} dalla formula 1.2, considerando i livelli di turbolenza misurati negli esperimenti.

Per mettere in evidenza un'eventuale correlazioni tra risultati teorici e sperimentali si introducono gli errori relativi:

$$\epsilon_k = \frac{|K_{teor} - K_{dati}|}{K_{dati}} \quad (4.4)$$

$$\epsilon_f = \frac{|f_{prandtl} - f_{exp}|}{f_{exp}} \quad (4.5)$$

I risultati relativi alla prova r^* e alla prova R^* sono esposti rispettivamente nella tabella 4.3 e nella tabella 4.4.

	Re $\simeq$ 3500	Re $\simeq$ 6000	Re $\simeq$ 12000
K_{teor}	2.31	1.26	0.63
K_{dati}	2.02	0.94	0.49
ϵ_k	0.14	0.34	0.29
$f_{prandtl}$	0.33	0.51	0.67
f_{exp}	0.95	0.68	0.74
ϵ_f	0.65	0.25	0.10

Tabella 4.3: Prova r^* , confronto tra dati teorici e sperimentali.

	Re $\simeq$ 3500	Re $\simeq$ 6000	Re $\simeq$ 12000
K_{teor}	0.43	0.24	0.41
K_{dati}	1.18	0.54	0.29
ϵ_k	0.64	0.56	0.41
$f_{prandtl}$	0.46	0.56	0.77
f_{exp}	1.21	0.91	0.90
ϵ_f	0.62	0.38	0.14

Tabella 4.4: *Prova R^** , confronto tra dati teorici e sperimentali.

Gli errori relativi a K sono probabilmente legati ai limiti del modello, ricavato empiricamente. Inoltre, poiché le reti presentano imperfezioni e risulta complicato misurarne con precisione le dimensioni caratteristiche, agli errori del modello si aggiungono degli errori sistematici.

Per quanto riguarda gli errori relativi a f invece, si può osservare come questi convergano all'aumentare del numero di Reynolds. Questo andamento fa presupporre che il modello di Prandtl sia più affidabile a numeri di Reynolds elevati.

Un altro fattore che può incidere sugli errori di f nella *prova R^** è il fatto che la distanza di misura dalla rete è molto inferiore a quella raccomandata.

Capitolo 5

Conclusioni

L'obiettivo di questo elaborato sperimentale era quello di trovare delle soluzioni che migliorassero la qualità del flusso in uscita di una specifica galleria del vento. Tale obiettivo è stato perseguito attraverso una preliminare ricerca in letteratura che ha fatto ricadere la scelta su reti e honeycomb.

Dopo una lunga serie di esperimenti effettuati variando le condizioni di alimentazione e configurazione e dopo aver confrontato i risultati ottenuti, siamo giunti alla conclusione che, salvo l'eccezione della prova con l'honeycomb nella configurazione con il convergente (che potrà essere verificata in futuro), tutte le prove hanno trovato una spiegazione fisica plausibile che giustificasse i risultati ottenuti.

In particolare si è potuto constatare che tutte le configurazioni con le reti con a valle il convergente hanno portato a una complessiva riduzione di turbolenza longitudinale (tra il 20% e il 40%, in base alla velocità del flusso).

Per quanto riguarda invece la serie di prove senza il convergente si sono ottenuti buoni risultati nell'impiego della rete a maglia fine e dell'honeycomb (con riduzione di turbolenza oltre il 30%, rispettivamente a $Re \simeq 6000$ e $Re \simeq 3500$), mentre l'impiego della rete a maglia larga non ha portato ai risultati sperati, poiché la distanza di misura dalla rete stessa era molto inferiore a quella raccomandata. In questo caso le prestazioni in termini di riduzione di turbolenza potrebbero migliorare inserendo a valle una porzione sufficientemente lunga di camera di calma per la dissipazione dei vortici generati dalla rete. Tali modifiche però porterebbero a ulteriori perdite e a un ulteriore ingombro della galleria del vento, probabilmente ingiustificati ai fini della galleria stessa.

Le prove con honeycomb e rete a maglia larga a monte della camera di calma hanno messo in evidenza l'efficacia e la necessità della stessa. L'assenza della camera infatti ha portato a una bassa riduzione se non a un aumento della turbolenza.

In conclusione si può dire che, visti i risultati ottenuti, sarà possibile implementare stabilmente le reti nella galleria del vento, tenendo conto delle condizioni di alimentazione e configurazione richieste.

Bibliografia

- [1] J. Barlow, W. Rae, and A. Pope. *Low-speed wind tunnel testing*. John Wiley sons, inc., 1999.
- [2] E. Foschi. Design of a return circuit for an open loop wind tunnel. *Elaborato Finale di Laurea, Università di Bologna*, Anno accademico 2019-2020.
- [3] A. V. Johansson and P. H. Alfredsson. On the structure of turbulent channel flow. *J. Fluid Md. (1982)*, VO . 122, pp. 295-314, 1982.
- [4] R. I. Loehrke and H. M. Nagib. Experiments on management of free-stream turbulence. *Agard Report*, 1972.
- [5] L. Prandtl. Attaining a steady air stream in wind tunnel. *National advisory comitee for aeronautics*, 1933.
- [6] J. Scheiman and J. Brookst. Comparison of experimental and theoretical turbulence reduction from screens, honeycomb, and honeycomb-screen combinations. *NASA Langley Research Center, Hampton, Va.*, 1981.
- [7] L. Zama. Messa a punta di una galleria del vento per l'analisi di flussi industriali complessi. *Elaborato Finale di Laurea, Università di Bologna*, Anno Accademico 2011-2012.