UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI GENOVA

SCUOLA POLITECNICA



TESI DI LAUREA IN INGEGNERIA MECCANICA

Validazione sperimentale in galleria del vento di sonda di velocità multiforo

Relatore:

Chiar.^{mo} Prof. Ing. Alessandro Bottaro

Correlatore:

Dott. Ing. Andrea Freda

Allievi:

Federico Pastore Luca Bella

Indice

1.	Prefazio	ne	4
2.	introduz	ione	5
3.	I sensori	di pressione: Generalità	6
3	.1. Sond	la pneumatica Aeroprobe Omniprobe	8
3	.2. Sond	la a 4 fori: "Cobra"	12
3	.3. Set u	p sperimentale	12
3	.4. Fasi	preliminari	14
4.	Fasi della	a prova	16
4	.1. Prim	a fase di prova	16
	4.1.1.	Prima terna di orientazioni	16
	4.1.2.	Seconda terna di orientazioni	20
	4.1.3.	Terza terna di orientazioni	22
4	.2. Seco	nda fase della prova	24
5.	Descrizio	one delle misure	25
6.	Due siste	emi di coordinate	
6	.1. Punt	i di singolarità	30
	6.1.1.	Primo punto di singolarità	30
	6.1.2.	Secondo punto di singolarità	31
6	.2. Rota	zione delle componenti	31
	6.2.1.	Rotazione tramite α e β	31
	6.2.2.	Rotazione di θ e ϕ	33
7.	Studio d	egli angoli di incidenza: angoli nominali e angoli effettivi	35
8.	Analisi e	confronto delle misurazioni	39
8	.1. Inter	ısità al variare di α	39
8	.2. Inter	ısità al variare di eta	42
8	.3. Inter	ısità al variare di ϕ	45
8	.4. Inter	ısità al variare di $ heta$	48
9.	Conclusi	oni	51
App	endice A	– La galleria del vento DICCA	52
	Camera	di prova e sezioni di misura	54
	Gruppo	notore	56
	Diverger	nti	57
	Angoli		58
	Camera	di calma e convergente	58

	Caratterizzazione e modellazione dell'impianto	60
10.	Riferimenti bibliografici	61

1. Prefazione

La scelta di intraprendere un lavoro in team è stata fatta sulla base dell'ottima intesa reciproca riscontrata durante la preparazione degli esami, oltre che fuori dall'ambiente universitario; abbiamo pensato che un tale lavoro avrebbe maggiormente rispecchiato quello di un ambiente professionale, nel quale la coordinazione tra i compiti di più persone corrisponde al raggiungimento del risultato finale.

Si è dimostrata, in sostanza, un'esperienza molto formativa, sia professionalmente che moralmente.

Nella scelta di questa trattazione, inoltre, abbiamo selezionato tra i campi disciplinari di maggiore interesse personale, quello che poteva fornire un'esperienza più poliedrica e fruttuosa.

La tesi in gioco si è quindi rivelata un'opera sviluppata dalla base, con il connubio tra un lavoro manuale, svolto nella preparazione della galleria e nelle lavorazioni in officina, e un lavoro tecnico e teorico nell'analisi dei dati relativi alle misurazioni del dispositivo e nelle valutazioni di tipo fisico-matematico nello studio dell'orientazione della sonda, confermate poi dalle elaborazioni dei dati sperimentali mediante il programma di calcolo MATLAB®.

Non di poco conto, nella scelta del lavoro di tesi, è stata l'impressione che abbiamo riscontrato nei riguardi del laboratorio della galleria del vento, fin da quando ci è stato presentato: siamo rimasti affascinati dall'avanguardia dei componenti e delle macchine ivi presenti, di tecnologia recente e dalle ampie potenzialità, e anche dal personale tecnico estremamente preparato e disponibile. Proprio il responsabile tecnico della galleria, l'ing. Andrea Freda, ci ha proposto l'opportunità di testare la sonda multiforo Omniprobe della casa di produzione di sonde pneumatiche AEROPROBE. Tale sonda rappresenta una tecnologia particolarmente avanzata per la rilevazione della velocità di un vento relativo, con una conformazione sferica ed un cono di captazione particolarmente ampio, elevandosi quindi a essere uno dei dispositivi di maggiore avanguardia nel suo campo.

Siamo quindi stati lieti di partecipare a questo progetto che ha rappresentato per noi un'opera completa, nata con la messa in atto del set up sperimentale e conclusa con un ben preciso obbiettivo: verificare le potenzialità della sonda nelle diverse configurazioni di misura, confrontandola con la sonda multiforo già presente in galleria.

Ringraziamo infine il nostro correlatore, il cui lavoro è stato fondamentale e di enorme sostegno in tutte le fasi del test, partendo dalle lavorazioni in officina fino alla programmazione, dove le sue notevoli competenze nel settore ci hanno permesso di partire da un codice MATLAB® da lui elaborato ad hoc, necessario al dialogo con i componenti di misurazione, e dunque acquisire il livello di conoscenza opportuno per poter effettuare un'analisi dei dati rilevati significativa.

2. introduzione

La sonda Omniprobe della ditta AEROPROBE è una sonda di velocità multiforo di recente sviluppo che permette di valutare l'intensità e il direzionamento del vento relativo con un cono di captazione eccezionalmente ampio (fino a 165°); tale particolarità rende questo dispositivo particolarmente adatto allo studio di moti turbolenti, ove il direzionamento principale del flusso è a priori sconosciuto.

All'acquisto del dispositivo da parte dell'Università di Genova, lo staff tecnico del laboratorio della galleria del vento, presso il dipartimento del DICCA, si è reso conto, mediante confronto in galleria con le sonde già disponibili, che il funzionamento della sonda poteva non essere corretto. Dopo ripetute ricalibrazioni da parte della casa costruttrice, l'obbiettivo della tesi qui presentata sarà quindi quello di valutare e verificare il funzionamento della Omniprobe effettuando confronti sensati e utili con le sonde di velocità presenti nel laboratorio della galleria, valutando il comportamento della sonda in differenti condizioni di misura.

La validazione è stata ottenuta mediante un confronto dei dati forniti dalla sonda in test con la sonda di velocità multiforo Cobra già presente in laboratorio. Si è deciso di sfruttare i dati forniti da quest'ultima, prendendoli come valori campione. Il tubo di Pitot, presente anch'esso in galleria, mediante l'ausilio della presa di pressione statica della stessa, ha permesso di avere un terzo riferimento per i valori d'intensità, ovvero di velocità media del flusso.

Dopo le fasi preliminari di pulitura e di disposizione della strumentazione e delle sonde, con il supporto tecnico del responsabile di laboratorio, abbiamo effettuato misurazioni ripetute, facendo variare le angolazioni della sonda, ottenibili mediante un'apposita base magnetica fissata al pianale, di 45° gradi volta per volta, prima nel piano verticale, quindi in quello orizzontale. Si è proceduto variando per ogni angolazione l'intensità del flusso, comandata direttamente mediante l'azionamento statico della ventola, in modo da ricreare condizioni di misura il più possibile differenti.

Prima di procedere con ogni misurazione, mediante l'utilizzo dei software Labview® e Matlab®, si è proceduto a garantire il corretto dialogo tra i trasduttori e i dispositivi per l'acquisizione dati. Tali dati acquisiti sono stati poi da noi rielaborati e confrontati, in modo tale da valutare le differenze tra le sonde sugli andamenti dei valori rilevati nelle varie condizioni di misura. Sono stati effettuati principalmente valutazioni sull' intensità, confrontandola con quella rilevata dalla sonda Cobra, e sui dati riguardanti l'inclinazione del vento relativo, raffrontandoli a quelli attesi a partire dall'inclinazione nota della sonda.

Al termine del confronto è stato possibile elaborare grafici che permettessero di apprezzare ulteriormente l'evoluzione dei valori nell'arco delle misurazioni effettuate. L'intera trattazione e l'analisi effettuata hanno messo in luce il funzionamento della sonda e quindi la sua possibilità di impiego in campo ingegneristico, dando la possibilità ad un futuro riutilizzo di tale strumento nei laboratori dell'Università di Genova.

3. I sensori di pressione: Generalità

È necessario prima di tutto definire un sensore come quel dispositivo capace di misurare fisicamente una determinata grandezza in ingresso e di convertirla, tramite amplificatori di segnale e trasduttori, in un segnale di diversa specie. I sensori vengono classificati in base al loro utilizzo e funzionamento: al fine di questa trattazione, verranno analizzate esclusivamente le diverse tipologie di sensori di pressione.

Una prima differenziazione alla base di tali tipologie consta proprio nel tipo di misurazione; si hanno rilevazioni di:

- Pressione relativa: pressione misurata relativamente a quella atmosferica
- *Pressione assoluta:* pressione misurata relativamente alla pressione nulla
- *Pressione differenziale:* pressione misurata relativamente ad un riferimento

Le sonde di pressione possono essere inoltre diversificate in relazione al fenomeno fisico che permette di osservare le variazioni di tale grandezza;

- Sonde gravitazionali: sfruttano la misura della quota di una colonna di liquido
- *Sonde meccaniche:* si basano sulla deformazione di un componente elastico inserito all'interno dello stesso sensore

• *Sonde elettriche:* tra le quali più diffuse sono quelle piezoelettriche, in grado di sfruttare particolari proprietà di alcuni solidi per la generazione di un segnale elettrico proporzionale alla deformazione subita dal solido, e quindi alla pressione agente [1].

La scelta di un sensore è legata, oltre che agli aspetti sopracitati, anche ad alcuni parametri prestazionali che la caratterizzano. Una sonda infatti si distingue in base al campo di misura richiesto, alla sensibilità, all'accuratezza ed al tipo di segnale uscente desiderato.

Il dispositivo più utilizzato e conosciuto è quello denominato "Tubo di Pitot statico" (vedi fig. 1), utilizzato per la valutazione della velocità di un fluido, spesso in stato aeriforme. Tale particolare dispositivo è munito di due prese di pressione, la prima posta anteriormente alla sonda e tangenzialmente al flusso, la seconda sul corpo del tubo e perpendicolarmente al flusso. Esse permettono di valutare rispettivamente la *pressione totale* e la *pressione statica*. A partire da tali quantità, attraverso la loro differenza, è possibile ottenere la cosiddetta *pressione dinamica*, proporzionale al quadrato della velocità del flusso in esame secondo tale definizione:

$$P_{tot} - P_{stat} = \frac{1}{2}\rho v^2 \,. \tag{1}$$

Uno dei più grandi vantaggi che caratterizza tale sonda è la sua semplicità; essa tuttavia si basa sull'ipotesi che il flusso mantenga, con ottima approssimazione, lo stesso livello di pressione totale nel passaggio da una presa all'altra. In situazioni particolari può accadere però che il campo di moto in esame presenti gradienti di velocità elevati tra le due prese, ad esempio se queste si trovano a distanze relativamente grandi tra di loro [2]. Il tubo di Pitot presenta applicazioni in numerosi campi ingegneristici quali, per esempio, il settore automobilistico e, soprattutto, quello aeronautico.



Figura 1: Tubo di Pitot statico.

Una seconda tipologia di sonde di velocità multiforo utilizzata è quella a 3 o 4 fori [3]: sono dispositivi, questi, in grado di analizzare lo sviluppo di un campo di moto fluido su un piano attraverso l'ottenimento di due componenti di velocità (vedi fig.2). Tali sensori sono in grado di fornire, oltre alla velocità, anche l'angolo di inclinazione del flusso rispetto all'asse di riferimento. Il primo foro permette di risalire alla pressione totale, il secondo ed il terzo misurano l'angolo di inclinazione, il quarto permette di valutare la pressione statica.



Figura 2: Schema rappresentativo sonda a quattro fori.

La figura 3 mostra cinque diverse tipologie di sonde pneumatiche bidimensionali. Queste possono presentare geometrie a spigolo (W e WT), a cilindro (YA), "cobra" (CA e CT), o a prisma (YC).



Figura 3: Geometrie sonde bidimensionali.

In alcuni casi, tuttavia, per poter ottenere risultati più soddisfacenti, è necessario analizzare il moto della singola particella di fluido in tutte e tre le direzioni. Sotto tale ipotesi si utilizzano sonde che presentano 5 o più prese di pressione in grado fornire dati sufficienti per risalire all'orientazione del flusso in esame nel sistema di riferimento.

Spesso le sonde a 5 o più fori presentano uno sbraccio ad "L" per esigenze funzionali; tale conformazione rappresenta tuttavia un ingombro trasversale che in alcune circostanze non è ammissibile (p.e. se la misurazione deve essere fatta a valle di una schiera statorica).

3.1. Sonda pneumatica Aeroprobe Omniprobe

Il sensore di pressione Aeroprobe Omniprobe [4] è progettato per applicazioni che richiedono un elevato range di angoli di incidenza. La particolarità di questo strumento di misurazione, rispetto alle ordinarie sonde di velocità multiforo, è di avere infatti un cono di captazione molto ampio, che si estende all'incirca fino a 160-165 gradi. Diversamente dalle sonde multiforo convenzionali, progettate con cinque o sette prese di pressione su punta conica, l'Omniprobe è equipaggiata con dodici aperture su punta sferica, garantendole in questo modo un più elevato angolo di incidenza misurabile. Tale quantità è tuttavia limitata dalla presenza dello sbraccio di sostegno, non permettendogli quindi di essere perfettamente omni-direzionale. Alcune immagini di tale sonda sono raffigurate in figura 4.



Figura 4: (a), (b), (c) Particolari Aeroprobe Omniprobe.

Tale dispositivo è adatto per applicazioni nelle quali la direzione predominante del flusso non è nota a priori, o in ambienti nei quali l'utente non ha spazio sufficiente per orientare ottimamente una sonda convenzionale. Come si può notare dalla figura 5, la sonda può presentarsi con uno sbraccio ad "L", oppure diritto: la relativa convenienza di utilizzo varia a seconda dell'applicazione. Analizzando più nel dettaglio la struttura della sonda, si può notare (figura 6), come le dodici prese di pressione convergano ciascuna sul rispettivo tubo di uscita, che consiste di fatto nel collegamento fra il trasduttore di segnale e la sonda stessa.

La sonda è infine dotata di un cosiddetto "riferimento", ossia un punto della stessa, indicato con l'incisione della lettera "R" sulla sua base, che permette di comprendere in modo rapido e univoco l'orientazione spaziale del dispositivo.



Figura 5: Geometria Aeroprobe Omniprobe con sbraccio diritto e ad L.



Figura 6: Schema di collegamento sonda-trasduttore.



Figura 7: Particolare del montaggio della sonda sul supporto.



Figura 8: Configurazione completa.

3.2. Sonda a 4 fori: "Cobra"

Il dispositivo da noi utilizzato per effettuare le misurazioni necessarie alla verifica di corretto funzionamento dell'Aeroprobe Omniprobe è la sonda pneumatica a quattro fori costruita dalla ditta *Turbulent flow instrumentation*, più conosciuta come "Cobra" [4] per la particolare geometria che la distingue. Tale sensore è in grado di rilevare valori istantanei di pressione con una frequenza di acquisizione pari a 2KHz ed un cono di captazione relativamente modesto, di circa 45°. Per tale ragione questa è particolarmente adatta ad applicazioni nelle quali il moto è prevalentemente monodimensionale o, al limite, con variazioni in termini di direzionalità relativamente modeste. Tale sonda è adatta quindi ad applicazioni che ne prevedono l'utilizzo in ambienti a turbolenza controllata quali le gallerie del vento.



Figura 9: Particolare (a) e schema sonda "Cobra" (b)

3.3. Set up sperimentale

È stato necessario predisporre la strumentazione al fine di garantire un valido confronto tra i dati rilevati dalla sonda AEROPROBE e la sonda multiforo del laboratorio della galleria (Cobra). L'idea è quindi quella di effettuare misurazioni in galleria del vento a velocità dell'aria crescenti (in modo da ricreare differenti condizioni di misura), modificando l'angolo di incidenza del vento rispetto alla sonda in test.

Il confronto dovrà essere svolto sulla base di un set up che preveda condizioni simili di misurazione (idealmente identiche) per la Omniprobe e per il Cobra, in modo che i dati siano il più possibile confrontabili. Ciò prevede che le due sonde debbano essere messe a distanza sufficiente breve l'una dall'altra, in modo da incontrare filetti fluidi che abbiano le stesse (o quasi) proprietà e caratteristiche cinematiche.

Per fare ciò si è pensato ad una disposizione tale da avere le due sonde provenienti da pareti contrapposte, in modo che i corpi degli strumenti perturbino il meno possibile il flusso che scorre sulle prese in pressione all'estremità delle sonde. Una sonda si troverà quindi proveniente dal basso verso l'alto con il supporto disposto sul pianale della camera di prova mentre l'altra si estenderà dall'alto verso il basso con un supporto mobile che diparte direttamente dal soffitto della camera. Per ridurre ulteriormente gli effetti di turbolenza, il supporto superiore, ovvero quello mobile, è stato realizzato con una sezione a profilo alare simmetrico.

Il supporto inferiore invece è costituito da una semplice base magnetica.

La distanza trasversale tra le due sonde è mantenuta, per ogni prova, a 10 cm; tale distanza è stata scelta in modo che le due sonde percepissero flussi che teoricamente avessero le stesse caratteristiche, ma che non venissero disturbati dall'esagerata vicinanza delle teste delle due sonde.



Figura 10: Vista laterale set up di prove (a); (b) Possibili disposizioni della sonda inferiore: le linee tratteggiate mostrano alcune configurazioni della sonda Omniprobe rispetto al Cobra che resta fisso. In tutte le disposizioni la testa delle due sonde rimane sempre accostata.

La misurazione è supportata anche dalle rilevazioni effettuate da un tubo di Pitot statico situato a monte delle sonde multiforo. Il riferimento statico delle sonde multiforo (Cobra, Omniprobe) è costituito da 18 prese in pressione di parete lungo la galleria, che si congiungono in un unico riferimento basato sulla media delle 18 misurazioni; tale riferimento consta quindi in un'unica uscita del circuito aeraulico delle prese in pressione che si scinde opportunamente tramite dei nodi per raggiungere le varie sonde.

Tutte le connessioni aerauliche sono compiute tramite tubi in un materiale sintetico denominato Tygon; la peculiarità di questo materiale consta nell'essere particolarmente flessibile e, sebbene ne esistano molte tipologie, nel nostro caso si realizza in tubi molto resistenti chimicamente e termicamente, oltre che meccanicamente.

3.4. Fasi preliminari

Prima di procedere con la vera e propria misurazione abbiamo dovuto preparare adeguatamente la strumentazione e la camera di prova della galleria in modo che le condizioni di sperimentazione fossero quelle appropriate. Ci siamo occupati, perciò, della pulitura della parete inferiore della camera di prova mediante solvente a petrolio bianco, in modo che la pavimentazione fosse priva degli eventuali collanti dovuti ad istallazioni di sperimentazioni precedenti. Quindi, abbiamo posizionato il pianale inferiore in legno ed un contiguo supporto in metallo per il fissaggio della base magnetica.



Figura 11: Visuale interna galleria del vento; camera di prova

Inoltre, siccome l'Aeroprobe era un oggetto nuovo nel laboratorio, sebbene fosse già presente un'estensione per il montaggio della sonda sul profilo superiore in carbonio, non erano ancora disponibili opportuni supporti ad hoc per il posizionamento della stessa sul pianale; per questo ne abbiamo creato uno che fungesse da sede per l'Omniprobe sulla base magnetica, ricavandolo da un parallelepipedo in plexiglass.

È stata quindi necessaria una lavorazione meccanica del pezzo per poter ottenere una cavità delle dimensioni necessarie ad ospitare la base della sonda (fig. 12).



(a)



(C)

Figura 12: (a), (b), (c), (d) Lavorazione supporto in Plexiglass per l'Aeroprobe Omniprobe.

Alla fine delle lavorazioni si è ottenuta un base di plexiglass con tre incavi: uno per ospitare l'Omniprobe (ponendo attenzione agli eventuali giochi), uno a madrevite per montare il blocchetto sulla base magnetica, ed infine un piccolo vano filettato per permettere ad un grano di serrare la base della sonda.

4. Fasi della prova

Si è deciso quindi di strutturare la misurazione in due fasi principali; nella prima, il cobra è connesso al supporto mobile superiore, mentre l'Omniprobe è fissata al pianale inferiore mediante la base magnetica ed il blocchetto in plexiglass. Nella seconda, la sonda AEROPROBE è installata nel supporto mobile mediante l'aggiunta dell'estensione in fibra di vetro, mentre la sonda Cobra non viene più utilizzata durante la sperimentazione.

Passiamo quindi ad analizzare singolarmente le due fasi di prova ed i conseguenti risultati.

4.1. Prima fase di prova

La prima fase di prova è organizzata, come già detto, con il Cobra sovrastante l'Omniprobe. In questa sessione le due sonde vengono accostate e viene fatta variare l'orientazione dell'Omniprobe, mantenendo sempre una distanza trasversale di 10 cm ed eseguendo nove prove per nove orientazioni differenti, ognuna con sei livelli di velocità: si ottiene così una matrice di dati 6x9 (6 valori di velocità per 9 orientazioni diverse).

Per effettuare le inclinazioni nel piano verticale, orientando la sonda in modo da formare un angolo preciso rispetto al piano orizzontale (0°, 45°, 90°), ci si è serviti di un misuratore elettronico di pendenza; in tale modo si è ridotto l'errore sul posizionamento della sonda rispetto alla galleria.

Le orientazioni sul piano orizzontale invece, sono state compiute a rigore di buon senso, generando posizioni il più precise possibili.

4.1.1. Prima terna di orientazioni

La logica delle orientazioni è studiata in modo tale che la direzione del flusso vari di 45 gradi nel piano verticale per ogni terna.

Nella prima terna di orientazioni viene quindi posizionata la sonda con il riferimento in direzione opposta al flusso e viene fatto variare l'angolo di inclinazione della sonda rispetto al piano orizzontale, che indicheremo con δ , di 45 gradi.

In questa fase ciò che varia nell'incidenza del flusso è appunto δ che, seguendo la variazione di orientazione dell'Aeroprobe varia con essa di 45 gradi ogni volta.

Nel seguito riportiamo le tre configurazioni utilizzate nelle altrettante condizioni di incidenza appena descritte a partire dalla condizione in cui la sonda Omniprobe Aeroprobe è posta verticalmente (figure 13-16). La prima prova, come precedentemente descritto, presenta la sonda in esame posta verticalmente rispetto alla galleria.



Figura 13: Prima terna e prima orientazione (Prova 1).



(b)

Figura 14: (a), (b) Particolari del set up.

Si passa ora alla seconda prova, nella quale la sonda Aeroprobe è stata ruotata di 45° sul piano verticale (figura 15).



Figura 15: Prima terna e seconda orientazione (prova 2)

La figura 16 mostra la terza configurazione adottata con la sonda Aeroprobe, posta orizzontalmente.



Figura 16: Prima terna e terza orientazione (prova 3).

4.1.2. Seconda terna di orientazioni

Nella seconda terna l'Omniprobe è stata orientata perpendicolarmente al flusso; anche in questo caso viene fatto variare l'angolo δ , ma in maniera opposta alla terna precedente, quindi a partire da 0° fino a 90°.

Le figure seguenti riportano, in ordine di esecuzione, le configurazioni adottate per le tre sperimentazioni effettuate in questa fase.

La prova numero 4 si presenta quindi come mostrato in figura 17.



(a)

(b)

Figura 17: Seconda terna e prima orientazione (prova 4) vista frontale (a), vista laterale (b). La figura 18 mostra il set up sperimentale adottato nella prova numero 5.



Figura 18: Seconda terna e seconda orientazione (prova 5).

La figura 19 rappresenta la prova 6, l'ultima configurazione adottata per questa terna di orientazione.



Figura 19: Seconda terna e terza orientazione (prova 6).

4.1.3. Terza terna di orientazioni

Nelle tre seguenti misurazioni abbiamo ruotato nuovamente la sonda Aeroprobe di 45° in senso antiorario attorno all'asse verticale della galleria ed abbiamo fatto variare, analogamente alle prove precedenti, l'angolo di incidenza con steps di 45°.

Le immagini seguenti riportano, in ordine, i set up di prova adottati nelle tre fasi sperimentali condotte in questa terna.

La figura 20 mostra quindi la prova numero 7, situazione nella quale la sonda in esame è posta verticalmente.



Figura 20: Terza terna e prima orientazione (prova 7).

Le immagini seguenti (figure 21 e 22) mostrano le condizioni delle prove 8 e 9.



Figura 21: Terza terna e seconda orientazione (prova 8).



Figura 22: terza terna e terza orientazione (prova 9).

4.2. Seconda fase della prova

Successivamente, alle misurazioni sopracitate si è posta quindi la sonda Aeroprobe Omniprobe su un supporto in fibra di vetro dedicato ed è stata poi fissata alla parete superiore della galleria.



(a)

(b)



(C)

(d)

Figura 23: (a), (b), (c), (d) Preparazione all'inversione delle sonde.

Con tale configurazione sono state effettuate altre due misurazioni, nelle quali l'orientazione del dispositivo è stata lasciata invariata, mentre la posizione assoluta della stessa è stata scelta in modo che coincidesse rispettivamente con le quote precedentemente assunte nella prima e nella terza prova.

5. Descrizione delle misure

Definiamo anzitutto l'intensità come il modulo del vettore velocità del vento

$$|V| = V = \sqrt{u^2 + v^2 + w^2}, \qquad (5.1)$$

in cui *u*, *v*, *w* rappresentano le tre componenti di tale vettore nel sistema di riferimento adottato, rispettivamente definite come

$$V \cos \alpha \cos \beta = u , \quad (5.2)$$
$$V \cos \beta \sin \alpha = w , \quad (5.3)$$
$$V \sin \beta = v , \quad (5.4)$$

dove α e β sono, in ordine, gli angoli di beccheggio ed imbardata (si veda la figura 26).

Come tutte le misurazioni che sono state effettuate, sono stati previsti sei stadi di velocità regolati direttamente mediante l'inverter per l'azionamento della ventola. La frequenza viene fatta variare secondo campioni da 5 Hz a partire da una frequenza minima di 10 Hz, cosicché si ha un campo di variazione da 10 Hz fino ad un massimo di 35 Hz. Il legame tra la frequenza dell'inverter e la velocità dell'aria nella galleria è di tipo quasi-lineare, come confermato dalle intensità registrate dalle sonde.



Figura 24: intensità registrata dall'Omniprobe in funzione della frequenza dell'inverter

Il diagramma di figura 24 mostra l'insieme dei valori d' intensità registrato dalla sonda Omniprobe nelle diverse configurazioni, visibile come gruppo di punti di colore diverso disposto ogni 5 Hz. La curva di colore blu, ottenuta mediante regressione lineare, permette di apprezzare la tendenza lineare della distribuzione di punti.



Figura 25: Intensità registrata dal Cobra in funzione della frequenza dell'inverter

Il diagramma di figura 25 è ottenuto in modo identico a quello di figura 24, utilizzando la sonda Cobra. Si può notare un andamento praticamente identico tra i due grafici. Ciò mette in luce non solo il legame proporzionale tra la velocità del vento in galleria e frequenza dell'inverter, bensì anche la somiglianza dei valori d' intensità registrati dalle due sonde, il che corrisponde ad un dato di partenza piuttosto interessante per il confronto in questione.

Si può analizzare quindi la differenza percentuale tra l'intensità registrata dalle sonde riferita a quella rilevata dal cobra, ottenendo così la matrice di dati che segue:

Diff. Perc. V	10Hz	15Hz	20Hz	25Hz	30Hz	35Hz
prova 1	-3,2	-3	-2,8	-3,8	-2,8	-3,1
prova 2	-0,4	-0,5	0,1	-1,8	-1,2	-1,4
prova 3	-1,7	-3,2	-1,9	-1,2	-0,3	-1,8
prova 4	-0,9	-2,7	-2,8	-3,9	-2,9	-3,3
prova 5	0,3	-2,2	-2,4	-3,8	-2,9	-3,7
prova 6	-0,1	-2,2	-2,4	-3,9	-3,1	-3,7
prova 7	-1,4	-2,8	-2,5	-3,8	-2,6	-2,8
prova 8	-0,6	-0,8	-0,7	-1,8	-1,1	-1,3
prova 9	2,3	0,6	-0,6	-1,9	-0,7	-1
prova 10	-	-	-	-	-	-
prova 11	-	-	-	-	-	-

Tabella 1: Differenze percentuali d'intensità Cobra-Omniprobe

La tabella 1 mostra che le differenze non superano il 4%; si tratta di valori accettabili in quanto potrebbero essere dovuti, oltre che a piccole variazioni del flusso da punto a punto, anche alle incertezze di entrambi gli strumenti. Ricordiamo infatti che i dati relativi alla sonda Omniprobe sono affetti, oltre che dall'incertezza analogica data dallo strumento meccanico, anche dalla conversione effettuata dallo scanner che non è direttamente integrato nello strumento, come invece sussiste nel Cobra. Nelle prove 10 e 11 la sonda Cobra non è presente nel test, motivo per il quale la tabella 1 non fornisce valori di differenza percentuale in uscita.

6. Due sistemi di coordinate

L'Omniprobe è una sonda multiforo, e come tale, è in grado di misurare le componenti di velocità del vettore velocità e i relativi angoli d'incidenza dello stesso.

Per fornire in maniera completa la direzione di un vettore sono quindi necessarie due coordinate angolari; a tale scopo la sonda fornisce due coppie di angoli. La prima coppia di angoli (α , β) è quella definita, rispettivamente, dall'angolo di beccheggio (pitch) e da quello di imbardata (yaw); la seconda (θ , ϕ) è individuata dagli angoli, in ordine, di cono (cone) e rollio (roll). Si tratta di due sistemi che forniscono le stesse informazioni ma che sono oltremodo necessari per poter definire in modo univoco la direzione del vettore.

È infatti piuttosto comune, a causa dell'incertezza della misurazione, ma soprattutto per fenomeni di turbolenza locale, avere angolazioni, secondo uno specifico sistema di coordinate, che non siano affatto rilevanti; chiameremo questi casi, che sono correlabili a specifiche incidenze del vento, come *punti di singolarità*, e li analizzeremo più nel dettaglio nel prossimo paragrafo. Grazie all'utilizzo simultaneo di due sistemi di coordinate angolari, quando uno dei due non riesce a fornire un valore esatto di misurazione (ovvero si trova in uno dei punti di singolarità per quel sistema di coordinate), l'altro sistema rende possibile una consultazione esatta (trascurando le incertezze) dell'inclinazione del vento relativo.

È fondamentale inoltre tenere conto dell'orientazione spaziale della sonda rispetto ad un sistema assoluto; infatti, se si ha intenzione di valutare le componenti assolute del vento in un dato ambiente (nel nostro caso la camera di prova della galleria del vento), bisogna ricordarsi che la sonda misura tali componenti rispetto ad un sistema solidale alla stessa.

Definiamo quindi $\{0_1, 0_2, 0_3\}$ la base riferita all'Omniprobe, e con $\{g_1, g_2, g_3\}$ quella riferita alla galleria del vento.

Lo scopo di quello che segue è quindi, oltre l'analisi dettagliata dei punti di singolarità dei sistemi di coordinate angolari, anche il ri-orientamento delle componenti di velocità misurate dall'Omniprobe nel suo sistema di riferimento (relativo), in modo da renderle ripartite secondo il sistema della galleria (assoluto).



Figura 26: Schema rappresentativo delle coordinate angolari e degli assi della base solidale [6].

6.1. Punti di singolarità

Evidenziamo innanzitutto alcuni relazioni utili tra le componenti di velocità ed i vari angoli misurati dalla sonda.

A partire dalle equazioni (5.1), (5.2), (5.3), (5.4) (che mettono in relazione le velocità misurate dall'Omniprobe con gli angoli di riferimento α , β , θ , ϕ), e ricordando che

$$V\cos\theta = \sqrt{u^2 + w^2}\cos\alpha, \qquad (6.1)$$

tramite opportune sostituzioni, si ottiene:

$$\theta = \cos^{-1}\left(\frac{\sqrt{u^2 + w^2} \cos \alpha}{\sqrt{u^2 + v^2 + w^2}}\right),$$
 (6.2)

$$\alpha = \cos^{-1}\left(\frac{\sqrt{u^2 + v^2 + w^2})\cos\theta}{\sqrt{u^2 + w^2}}\right).$$
 (6.3)

6.1.1. Primo punto di singolarità

In tale condizione gli angoli ideali (quindi senza errori legati all'installazione ed alle misurazioni) sarebbero θ = 90° e β = 90°. Tali angoli rendono il vettore **V**, secondo le componenti misurate dall'Omniprobe, un vettore uniassiale di unica componente *v*. Appare chiaro quindi, dalle formule (5.1), (5.2) e (5.3), oltre a quelle riportate nel paragrafo precedente, che il calcolo dell'angolo α risulta di forma indeterminata. Risulta infatti:

$$\alpha = \cos^{-1}(\frac{\cos\theta}{\cos\beta}). \qquad (6.4)$$

Quando si effettuano misure di incidenza del vento sull'asse y, non avrà quindi più senso considerare α , in quanto esso perde di significato.

Consideriamo quindi possibili variazioni degli angoli $\theta \in \phi$ dovute a incertezze del dispositivo ed errori di installazione; al variare di θ si avrà la generazione di una componente $u = \mathbf{V} \cos \theta$, mentre al variare di ϕ si avrà l'insorgere di una componente $w = \mathbf{V} \sin \phi$, e quindi α , che può essere scritto in funzione di $w \in u$, sarà:

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{w}{u} = \tan^{-1} \left(\frac{\sin \phi}{\cos \theta} \right). \quad (6.5)$$

Il caso ideale, ovvero quello con gli angoli nominali di installazione, presenta nuovamente una forma indeterminata ($\theta = 90^\circ$; $\phi = 180^\circ$).

È chiaro, perciò, che nella pratica questo rapporto presenterà sia al numeratore che al denominatore valori molto piccoli, dovuti ad errori di misura e a turbolenze del flusso. In conclusione, quando **V** appartiene all'asse y del riferimento di sonda, si avrà una variazione delle tre componenti *u*, *v*, *w* al variare di ϕ e θ , ed a partire da questi si genereranno valori definiti di α .

6.1.2. Secondo punto di singolarità

Un altro caso di particolare interesse si ha quanto **V** si trova lungo l'asse x della sonda, che è il caso della terza misurazione effettuata. In tali condizioni si ha, nel caso ideale, $\theta = 0^\circ e \alpha = 0^\circ$. Fissando $\alpha = 0^\circ$ e variando θ si ha generazione della componente $v = \mathbf{V} \sin \beta$; al variare di α e fissando $\theta = 0^\circ$ si avrà invece una componente $w = \mathbf{V} \sin \alpha$. A partire dalla definizione dell'angolo ϕ (si veda la figura 26) si otterrà quindi:

$$\phi = \tan^{-1} \frac{w}{v} = \tan^{-1} \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}. \quad (6.6)$$

Come in precedenza, appare quindi chiaro che nel caso ideale tale configurazione presenta nuovamente una forma indeterminata, dunque si avranno valori di scarso interesse relativi all'angolo ϕ , che in tale condizione dovrebbe essere sempre nullo.

6.2. Rotazione delle componenti

Per poter ottenere la riscrittura delle componenti nel sistema assoluto è necessario operare sulle componenti di velocità fornite dalla sonda Aeroprobe trasformandole mediante opportune matrici di rotazione.

L'importante ipotesi che sta alla base della nostra trattazione è quella di considerare l'asse *x* del sistema di galleria come coincidente con la direzione del vettore velocità del vento relativo. Quest'ipotesi ci ha permesso di individuare una prima orientazione della sonda rispetto al sistema di riferimento assoluto. Si tratta di un'ipotesi non così forte, in quanto le fluttuazioni del vettore velocità intorno a tale asse, dovute alla turbolenza e alla simmetria non perfetta del condotto della galleria, sono (con relativamente buona approssimazione) trascurabili. La scelta dei restanti assi di riferimento può essere fatta arbitrariamente oppure può essere determinata in maniera univoca se si conosce la completa orientazione spaziale della sonda rispetto ad un sistema di riferimento assoluto. È importante notare quindi che il cambio di base che andiamo ad operare sulle componenti di velocità è in realtà un cambio di base parziale in quanto le componenti di velocità vengo riproiettate con esattezza solamente lungo un solo asse, ossia l'asse principale di galleria x, individuato univocamente dall'orientazione del vettore velocità del vento.

6.2.1. Rotazione tramite $\alpha \in \beta$

Per effettuare la prima rotazione, ci serviamo degli angoli $\alpha \in \beta$, in modo da allineare l'asse *x* del riferimento solidale alla sonda con quello della galleria.

Per poter riferire le componenti di velocità misurate dall'Omniprobe nel suo sistema di riferimento $\{0_1, 0_2, 0_3\}$, nel riferimento assoluto $\{g_1, g_2, g_3\}$ occorrono due rotazioni distinte: una rotazione oraria attorno ad \mathbf{o}_2 di un angolo α , seguita da una rotazione antioraria intorno ad \mathbf{o}_3 di un angolo β .

Un qualsiasi vettore **u** può essere scritto in funzione dei versori della base a cui esso fa riferimento [7]; utilizzando la notazione Einsteiniana, ossia che considera somma sugli indici ripetuti, si avrà:

$$\mathbf{u} = u_k \mathbf{o}_k = \hat{u}_h \boldsymbol{g}_h \,. \qquad (6.7)$$

Un qualsiasi versore h-esimo può essere inoltre scritto come

$$\boldsymbol{g}_h = \sum_k (\boldsymbol{g}_h \cdot \boldsymbol{o}_k) \boldsymbol{o}_k$$
. (6.8)

Definiamo inoltre la quantità ($\mathbf{g}_h \cdot \mathbf{o}_k$) = R_{hk} come matrice di rotazione dalla base relativa alla base assoluta; risulta infatti:

$$\mathbf{g}_h = \mathbf{R}_{hk} \mathbf{o}_k \,. \tag{6.9}$$

A partire quindi dalla definizione del generico vettore **u** si ha:

$$\hat{u}_h = (\mathbf{u} \cdot \mathbf{g}_h) = \mathbf{u} \cdot [(\mathbf{g}_h \cdot \mathbf{o}_k)\mathbf{o}_k] = \mathbf{u}R_{hk}\mathbf{o}_k = R_{hk}(\mathbf{u} \cdot \mathbf{o}_k) = R_{hk}u_k.$$
(6.10)

Ritornando al nostro caso in particolare, per eseguire la prima e la seconda rotazione definiamo le seguenti matrici di rotazione:

$$R_{\alpha} = \begin{pmatrix} \cos \alpha & 0 & \sin \alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \alpha & 0 & \cos \alpha \end{pmatrix}, \quad (6.11)$$
$$R_{\beta} = \begin{pmatrix} \cos \beta & \sin \beta & 0 \\ -\sin \beta & \cos \beta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (6.12)$$

La rotazione complessiva, essendo le rotazioni non commutative, è definita come:

$$R_{tot(\alpha,\beta)} = R_{\beta}R_{\alpha},$$

$$R_{tot(\alpha,\beta)} = \begin{pmatrix} \cos\alpha\cos\beta & \sin\beta & -\cos\beta\sin\alpha \\ -\cos\beta\sin\alpha & \cos\beta & \sin\alpha\sin\beta \\ \sin\alpha & 0 & \cos\alpha \end{pmatrix}.$$
 (6.13)

Attraverso tale matrice possono quindi essere determinate le componenti di velocità misurate dall'Omniprobe rispetto al riferimento assoluto. Affinché ciò sia vero, è necessario che la norma del vettore trasformato sia pari a quella del vettore di partenza e ciò è possibile solamente se la matrice R_{tot} è una matrice ortogonale. Al fine di verificare che ciò sia vero si utilizza la nota proprietà delle matrici ortogonali, ossia:

$$R_{tot(\alpha,\beta)}R_{tot(\alpha,\beta)}^{t} = I. \quad (6.14)$$

Dove I rappresenta la matrice identità, mentre l'apice t indica la matrice trasposta.

6.2.2. Rotazione di $\theta \in \phi$

Devono ora essere trovate le trasformazioni per gli angoli $\theta \in \phi$. Questa volta la rotazione totale sarà composta da una rotazione antioraria attorno ad **e**₁ di un angolo ϕ e da una seconda rotazione attorno ad **e**₃ di un angolo θ . Si definiscono così rispettivamente due matrici di rotazione:

$$R_{\phi} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & \sin \phi \\ 0 & -\sin \phi & \cos \phi \end{pmatrix}, \quad (6.15)$$
$$R_{\theta} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (6.16)$$

La matrice di rotazione totale sarà quindi:

$$\mathbf{R}_{tot(\theta,\phi)} = \mathbf{R}_{\theta}\mathbf{R}_{\phi},$$

$$R_{tot(\theta,\phi)} = \begin{pmatrix} \cos\theta & \cos\phi\sin\theta & \sin\phi\sin\theta \\ -\sin\phi & \cos\phi\cos\theta & \cos\theta\sin\phi \\ 0 & -\sin\phi & \cos\phi \end{pmatrix}.$$
 (6.17)

Anche in questo caso, per verificare che tale matrice non alteri il modulo del vettore ruotato, è sufficiente valutare che valga la proprietà:

$$R_{tot(\theta,\phi)}R_{tot(\theta,\phi)}^{t} = I. \quad (6.18)$$

È banale notare che le rotazioni qui proposte siano effettivamente parziali dal fatto che il cambio di base è ottenuto mediante due sole rotazioni anziché tre, che è risaputo essere un cambio di base spaziale completo. Questo deriva dal fatto che i dati forniti dall'Omniprobe non sono di per sé sufficienti ad effettuare una tale operazione completa, fornendo solamente una coppia di componenti di rotazione per volta. Si può quindi risalire ad una rotazione completa delle componenti di velocità aggiungendo un ulteriore coordinata di rotazione, il cui valore è noto solamente se è nota la posizione spaziale della sonda rispetto al sistema di riferimento globale scelto. Data tale coordinata e stabilita la sua matrice di rotazione, la rotazione completa sarà fornita dalla matrice ottenuta pre-moltiplicando le matrici delle ulteriori coordinate con quelle precedentemente fornite.

Nel nostro caso, vista la complicatezza dell'operazione, ci limitiamo a citare la possibilità di effettuare un tale procedimento, senza confrontare dati numerici; infatti, i dati riguardanti la posizione spaziale assoluta della Omniprobe derivano solamente dalla conoscenza del posizionamento approssimativo della sonda effettuato mediante la sua base magnetica. È ovvio quindi che un tale calcolo applicato a dei dati così imprecisi fornirebbe dei risultati poco significativi.

7. Studio degli angoli di incidenza: angoli nominali e angoli effettivi

Nelle prove per testare la sonda Omniprobe sono state scelte orientazioni che, come già detto, permettessero di simulare la differente incidenza del vento. Tali orientazioni prevedevano angoli di posizionamento relativo sonda-galleria fissati. Sebbene la misura di tali angoli sia stata verificata mediante opportuni strumenti di laboratorio, tale valutazione è ritenibile approssimativa e comunque indicativa, in quanto lo scopo non era avere una risposta ad un'angolazione esatta della sonda, bensì verificare che essa fosse in grado di fornire risultati corretti al variare dell'incidenza, qualunque essa fosse.

Per questo motivo si possono rilevare errori, o meglio, divergenze tra gli angoli α , β , θ , ϕ che dovrebbero risultare dal posizionamento teorico della sonda e quelli effettivamente registrati dalla stessa. Presentiamo qui schematicamente il risultato del confronto tra le due matrici di angoli per tutte le fasi del test.

Dapprima riportiamo nelle tabelle 2-5 gli angoli nominali, ovvero quelli che, nominalmente, dovrebbero risultare dal posizionamento teorico della sonda rispetto alla galleria.

α	10Hz	15Hz	20Hz	25Hz	30Hz	35Hz
prova 1	90	90	90	90	90	90
prova 2	45	45	45	45	45	45
prova 3	0	0	0	0	0	0
prova 4	ND	ND	ND	ND	ND	ND
prova 5	ND	ND	ND	ND	ND	ND
prova 6	ND	ND	ND	ND	ND	ND
prova 7	90	90	90	90	90	90
prova 8	45	45	45	45	45	45
prova 9	0	0	0	0	0	0
prova 10	-90	-90	-90	-90	-90	-90
prova 11	-90	-90	-90	-90	-90	-90

Tabella 2: Matrice degli angoli nominali per α in tutti i set di prove.

β	10Hz	15Hz	20Hz	25Hz	30Hz	35Hz
prova 1	0	0	0	0	0	0
prova 2	0	0	0	0	0	0
prova 3	0	0	0	0	0	0
prova 4	-90	-90	-90	-90	-90	-90
prova 5	-90	-90	-90	-90	-90	-90
prova 6	-90	-90	-90	-90	-90	-90
prova 7	-45	-45	-45	-45	-45	-45
prova 8	-45	-45	-45	-45	-45	-45
prova 9	-45	-45	-45	-45	-45	-45
prova 10	0	0	0	0	0	0
prova 11	0	0	0	0	0	0

Tabella 3: Matrice degli angoli nominali per β in tutti i set di prove.

θ	10Hz	15Hz	20Hz	25Hz	30Hz	35Hz
prova 1	90	90	90	90	90	90
prova 2	45	45	45	45	45	45
prova 3	0	0	0	0	0	0
prova 4	90	90	90	90	90	90
prova 5	90	90	90	90	90	90
prova 6	90	90	90	90	90	90
prova 7	90	90	90	90	90	90
prova 8	60	60	60	60	60	60
prova 9	45	45	45	45	45	45
prova 10	90	90	90	90	90	90
prova 11	90	90	90	90	90	90

Tabella 4: Matrice degli angoli nominali per θ in tutti i set di prove.

φ	10Hz	15Hz	20Hz	25Hz	30Hz	35Hz
prova 1	90	90	90	90	90	90
prova 2	90	90	90	90	90	90
prova 3	ND	ND	ND	ND	ND	ND
prova 4	180	180	180	180	180	180
prova 5	180	180	180	180	180	180
prova 6	180	180	180	180	180	180
prova 7	135	135	135	135	135	135
prova 8	135	135	135	135	135	135
prova 9	180	180	180	180	180	180
prova 10	-90	-90	-90	-90	-90	-90
prova 11	-90	-90	-90	-90	-90	-90

Tabella 5: Matrice degli angoli nominali per ϕ in tutti i set di prove.

Come si vede dalle tabelle, alcuni angoli assumono valori ignoti evidenziati dalla dicitura ND (non-determinato). Tale indeterminazione è data per le posizioni secondo le quali si hanno i cosiddetti *punti di singolarità* precedentemente descritti.

Se si confrontano, come già detto, gli angoli misurati con quelli nominali sopraelencati, si può valutare la differenza tra i valori dei primi e dei secondi per tutte le serie di prove. Si ottengono così i valori per le differenze riportati nelle tabelle 6-9.

Δα	10Hz	15Hz	20Hz	25Hz	30Hz	35Hz
prova 1	9,7	2,9	2,8	2,7	2,7	2,8
prova 2	1,4	1,4	1,6	2,2	2,4	2,4
prova 3	-2,3	-1,8	-1,8	-1,6	-1,8	-1,9
prova 4	ND	ND	ND	ND	ND	ND
prova 5	ND	ND	ND	ND	ND	ND
prova 6	ND	ND	ND	ND	ND	ND
prova 7	6,0	3,2	3,1	3,1	3,3	3,6
prova 8	-1,5	-1,5	-1,6	-1,8	-2,1	-2,4
prova 9	-7,7	-6,7	-6,1	-5,0	-5,2	-6,1
prova 10	-5,2	-4,1	-4,9	-4,1	-3,8	-3,8
prova 11	-5,4	-4,5	-4,3	-4,2	-4,0	-4,0

Tabella 6: Matrice delle differenze angolari tra angoli nominali e misurati per α .

Δβ	10Hz	15Hz	20Hz	25Hz	30Hz	35Hz
prova 1	-2,3	-2,6	-2,6	-2,6	-2,7	-2,8
prova 2	-1,0	-1,7	-1,3	-2,5	-3,0	-2,8
prova 3	2,2	1,3	1,1	0,3	0,4	0,7
prova 4	-7,3	-6,9	-6,5	-6,2	-6,3	-6,7
prova 5	-7,1	-6,7	-6,2	-5,6	-5,7	-5,5
prova 6	-6,5	-5,8	-5,4	-4,5	-4,7	-5,5
prova 7	-8,0	-9,0	-9,1	-9,2	-9,3	-9,3
prova 8	-6,7	-7,4	-7,6	-8,0	-8,0	-8,3
prova 9	-3,4	-3,2	-3,3	-3,6	-3,7	-3,6
prova 10	5,3	5,1	5,9	5,6	5,6	5,9
prova 11	5,4	5,2	5,6	5,7	5,7	6,0

Tabella 7: Matrice delle differenze angolari tra angoli nominali e misurati per β .

$\Delta heta$	10Hz	15Hz	20Hz	25Hz	30Hz	35Hz
prova 1	2,2	2,6	2,8	2,7	2,7	2,8
prova 2	1,4	1,4	1,5	2,2	2,3	2,3
prova 3	-3,3	-2,2	-2,1	-1,7	-1,8	-2,0
prova 4	2,9	3,0	2,6	2,5	2,5	2,7
prova 5	3,5	3,7	3,4	3,3	3,2	1,2
prova 6	2,6	2,4	2,3	2,1	2,1	2,0
prova 7	2,8	2,6	2,5	2,5	2,7	3,0
prova 8	2,6	3,0	3,0	3,1	2,9	2,9
prova 9	2,7	2,6	2,9	3,4	3,4	3,2
prova 10	4,4	4,1	4,8	4,1	3,8	3,7
prova 11	4,8	4,5	4,3	4,1	4,0	4,0

Tabella 8: Matrice delle differenze angolari tra angoli nominali e misurati per θ .

$\Delta \phi$	10Hz	15Hz	20Hz	25Hz	30Hz	35Hz
prova 1	2,3	2,6	2,6	2,6	2,7	2,8
prova 2	1,4	2,5	2,0	3,7	4,4	4,2
prova 3	ND	ND	ND	ND	ND	ND
prova 4	5,6	5,3	5,2	5,1	5,2	5,6
prova 5	4,9	4,7	4,3	3,9	4,2	4,8
prova 6	4,7	4,4	4,1	3,6	3,9	4,7
prova 7	7,8	8,9	9,0	9,1	9,2	9,2
prova 8	-2,6	-1,8	-1,6	-1,1	-0,9	-0,4
prova 9	8,6	7,4	6,8	5,6	5,9	6,8
prova 10	5,3	5,1	6,0	5,6	5,6	6,0
prova 11	5,4	5,3	5,6	5,7	5,7	6,0

Tabella 9: Matrice delle differenze angolari tra angoli nominali e misurati per ϕ .

Si può notare che le differenze non superano mai la decina di gradi; inoltre, laddove gli angoli nominali assumono valori indeterminati, come conseguenza dei punti di singolarità, effettuare la differenza perde di significato (come risulta dalla dicitura ND). Dal punto che i posizionamenti della sonda sono stati compiuti manualmente, tali divergenze tra i valori nominali e quelli misurati risultano comunque accettabili, dimostrando che la sonda è in grado di misurare in maniera precisa ed efficace l'angolazione dell'incidenza del vento relativo.

8. Analisi e confronto delle misurazioni

Si è proceduto andando ad analizzare, per ciascuna delle prove effettuate, l'intensità misurata dalla sonda al variare dei quattro angoli α , β , θ , ϕ in modo da poter valutarne la relativa affidabilità nella misurazione. Le curve qui rappresentate sono, in realtà, una successione di punti ben definita e quantificabile, ma per semplicità di trattazione si è preferito congiungere tale successione tramite software dedicato MATLAB®.

8.1. Intensità al variare di α

Si procede all'analisi dell'intensità misurata dall'Aeroprobe Omniprobe al variare dell'angolo α . Le tabelle 10 e 11 riportano rispettivamente i valori misurati dalla sonda e le varie condizioni di α per ciascuna prova effettuata.

V a	10Hz	15Hz	20Hz	25Hz	30Hz	35Hz
prova 1	5,5	8,4	11,3	14,2	17,1	20,0
prova 2	5,5	8,5	11,5	14,3	17,1	20,1
prova 3	5,4	8,2	11,2	14,3	17,2	20,0
prova 4	5,6	8,4	11,2	14,1	16,9	19,8
prova 5	5,6	8,4	11,2	14,0	16,9	19,7
prova 6	5,6	8,4	11,3	14,0	16,9	19,7
prova 7	5,5	8,4	11,2	14,1	16,9	19,9
prova 8	5,5	8,5	11,4	14,3	17,1	20,1
prova 9	5,7	8,6	11,4	14,2	17,2	20,1
Prova 10	5,3	8,2	11,1	13,8	16,6	19,5
prova 11	5,4	8,2	11,0	13,8	16,6	19,5

Tabella 10: Intensità misurata dall'Aeroprobe Omniprobe.

α	10Hz	15Hz	20Hz	25Hz	30Hz	35Hz
Prova 1	80,3	87,1	87,2	87,3	87,3	87,2
Prova 2	43,6	43,6	43,4	42,8	42,6	42,6
Prova 3	2,3	1,8	1,8	1,6	1,8	1,9
Prova 4	61,8	59,9	63,0	63,7	64,2	64,6
Prova 5	54,4	51,7	51,5	49,2	52,5	75,5
Prova 6	60,0	61,1	60,7	59,9	62,0	66,8
Prova 7	84,0	86,8	86,9	86,9	86,7	86,4
Prova 8	46,5	46,5	46,6	46,8	47,1	47,4
Prova 9	7,7	6,7	6,1	5,0	5,2	6,1
prova 10	-84,8	-85,9	-85,1	-85,9	-86,2	-86,2
prova 11	-84,6	-85,5	-85,7	-85,8	-86,0	-86,0

Tabella 11: Valori misurati di α .

A partire dai precedenti dati, tramite linearizzazione, si è costruito il grafico in figura 27. Le curve in isovelocità rappresentate nei seguenti diagrammi presentano tre diverse colorazioni; i tratti di colore blu rappresentano la prima terna di orientazioni, quelli di colore nero la seconda terna di orientazioni mentre le curve riportate in rosso corrispondono alla terza terna.



Figura 27: Andamento dell'intensità misurata al variare di α .

Come si può notare, l'affidabilità della sonda si mantiene pressoché inalterata al variare dell'angolo α ; si osserva infatti che il valore d' intensità misurato rimane con buona approssimazione inalterato anche all'incrementare di tale angolo. È interessante inoltre osservare come per ciascuna prova a velocità costante nella seconda terna, α copra valori limitati e poco significativi; tale fenomeno è pienamente giustificato da quanto detto prima a proposito dei punti di singolarità (in questo caso, si tratta del 1° punto di singolarità).

Presentiamo in seguito i diagrammi corrispondenti alle singole prove (figura 28).



Figura 28: Intensità misurata dall' Omniprobe al variare di α a (a) 10Hz, (b) 15Hz, (c) 20Hz, (d) 25Hz, (e) 30Hz, (f) 35Hz.

8.2. Intensità al variare di β

Così come è stato fatto per l'angolo α , anche per β si è proceduto con l'analisi dei dati misurati dal dispositivo. I valori dell'intensità registrata dall'Omniprobe sono noti dalla tabella 10, mentre quelli dell'angolo β misurato in ogni prova sono disponibili nella tabella 12.

β	10Hz	15Hz	20Hz	25Hz	30Hz	35Hz
prova 1	2,3	2,6	2,6	2,6	2,7	2,8
prova 2	1,0	1,7	1,3	2,5	3,0	2,8
prova 3	-2,2	-1,3	-1,1	-0,3	-0,4	-0,7
prova 4	-82,7	-83,1	-83 <i>,</i> 5	-83,8	-83,7	-83,3
prova 5	-82,9	-83,3	-83,8	-84,4	-84,3	-84,5
prova 6	-83,5	-84,2	-84,6	-85,5	-85,3	-84,5
prova 7	-37,0	-36,0	-35,9	-35,8	-35,7	-35,7
prova 8	-38,3	-37,6	-37,4	-37,0	-37,0	-36,7
prova 9	-41,6	-41,8	-41,7	-41,4	-41,3	-41,4
prova 10	-5,3	-5,1	-5,9	-5,6	-5,6	-5,9
prova 11	-5,4	-5,2	-5,6	-5,7	-5,7	-6,0

Tabella 12: Valori misurati di β

A partire dai dati precedentemente mostrati, congiungendo nuovamente i punti, si è ottenuto il seguente diagramma:



Figura 29: Andamento dell'intensità al variare di β .

Come si può notare dalla figura 29, l'estensione di β è particolarmente concentrata in corrispondenza degli angoli nominali 0°,45°,90°. Ciò è diretta conseguenza delle configurazioni scelte durante la sperimentazione. Ad ogni modo l'andamento del grafico mostra come l'affidabilità della sonda sia sostanzialmente indipendente dalla variazione dell'angolo β .

Mostriamo quindi, nella pagina seguente, le isovelocità per ogni prova (figura 30).



Figura 30: Modulo del vettore velocità misurata dall'Omniprobe al variare di β a (a) 10Hz, (b) 15Hz, (c) 20Hz, (d) 25Hz, (e) 30Hz, (f) 35Hz.

8.3. Intensità al variare di ϕ

V a	10Hz	15Hz	20Hz	25Hz	30Hz	35Hz
prova 1	5,5	8,4	11,3	14,2	17,1	20,0
prova 2	5,5	8,5	11,5	14,3	17,1	20,1
prova 3	5,4	8,2	11,2	14,3	17,2	20,0
prova 4	5,6	8,4	11,2	14,1	16,9	19,8
prova 5	5,6	8,4	11,2	14,0	16,9	19,7
prova 6	5,6	8,4	11,3	14,0	16,9	19,7
prova 7	5,5	8,4	11,2	14,1	16,9	19,9
prova 8	5,5	8,5	11,4	14,3	17,1	20,1
prova 9	5,7	8,6	11,4	14,2	17,2	20,1
prova 10	5,3	8,2	11,1	13,8	16,6	19,5
prova 11	5,4	8,2	11,0	13,8	16,6	19,5

Si procede ora all'analisi dei dati misurati per la seconda coppia di angoli, con il medesimo procedimento dei precedenti. Si riportano, per comodità, le tabelle 13 e 14.

Tabella 10

φ	10Hz	15Hz	20Hz	25Hz	30Hz	35Hz
prova 1	87,7	87,4	87,4	87,4	87,3	87,2
prova 2	88,6	87,5	88,0	86,3	85,6	85,8
prova 3	127,0	124,8	120,0	99 <i>,</i> 3	102,4	109,6
prova 4	174,4	174,7	174,8	174,9	174,8	174,4
prova 5	175,1	175,3	175,7	176,1	175,8	175,2
prova 6	175,3	175,6	175,9	176,4	176,1	175,3
prova 7	127,2	126,1	126,0	125,9	125,8	125,8
prova 8	137,6	136,8	136,6	136,1	135,9	135,4
prova 9	171,4	172,6	173,2	174,4	174,1	173,2
prova 10	-95,3	-95,1	-96,0	-95,6	-95,6	-96,0
prova 11	-95,4	-95,3	-95,6	-95,7	-95,7	-96,0

Tabella 13: Valori misurati di ϕ

Anche in questo caso, si può costruire, a partire dalle tabelle precedenti, il seguente diagramma:



Figura 31: Andamento dell'Intensità del vettore velocità al variare di ϕ .

Anche in questo caso la velocità misurata dalla sonda risulta pressoché indipendente dall'angolo in esame. È interessante tuttavia notare come, così come per l'angolo α , vi sia un intervallo di ϕ (Roll), in questo caso appartenente alla terza prova della prima terna (curva blu) che risulta poco significativo; tale caratteristica è dovuta in questo caso al secondo dei due punti di singolarità.

In seguito riportiamo, al solito, le singole iso-velocità separatamente (figura 32).



Figura 32: Intensità misurata dalla sonda Aeroprobe al variare di ϕ a (a) 10Hz, (b) 15Hz, (c) 20Hz, (d) 25Hz, (e) 30Hz, (f) 35Hz.

8.4. Intensità al variare di θ

Si è giunti all'analisi dell'ultimo angolo di riferimento, θ . Così come è stato fatto in precedenza, si riportano in tabella i dati relativi all'intensità misurata dalla sonda e l'ampiezza dell'angolo in esame, in tutte le 11 misurazioni di prova.

V a	10Hz	15Hz	20Hz	25Hz	30Hz	35Hz
prova 1	5,5	8,4	11,3	14,2	17,1	20,0
prova 2	5,5	8,5	11,5	14,3	17,1	20,1
prova 3	5,4	8,2	11,2	14,3	17,2	20,0
prova 4	5,6	8,4	11,2	14,1	16,9	19,8
prova 5	5,6	8,4	11,2	14,0	16,9	19,7
prova 6	5,6	8,4	11,3	14,0	16,9	19,7
prova 7	5,5	8,4	11,2	14,1	16,9	19,9
prova 8	5,5	8,5	11,4	14,3	17,1	20,1
prova 9	5,7	8,6	11,4	14,2	17,2	20,1
prova 10	5,3	8,2	11,1	13,8	16,6	19,5
prova 11	5,4	8,2	11,0	13,8	16,6	19,5

Tabella 10

θ	10Hz	15Hz	20Hz	25Hz	30Hz	35Hz
prova 1	87,8	87,4	87,2	87,3	87,3	87,2
prova 2	43,6	43,6	43,5	42,8	42,7	42,7
prova 3	3,3	2,2	2,1	1,7	1,8	2,0
prova 4	87,1	87,0	87,4	87,5	87,5	87,3
prova 5	86,5	86,3	86,6	86,7	86,8	88,8
prova 6	87,4	87,6	87,7	87,9	87,9	88,0
prova 7	87,2	87,4	87,5	87,5	87,3	87,0
prova 8	57,4	57,0	57,0	56,9	57,1	57,1
prova 9	42,3	42,4	42,1	41,6	41,6	41,8
prova 10	85,6	85,9	85,2	85,9	86,2	86,3
prova 11	85,2	85,5	85,7	85,9	86,0	86,0

Tabella 14: Valori misurati di θ .



Anche in questo caso, tramite software MATLAB®, si è giunti al seguente diagramma:

Figura 33: Andamento dell' intensità al variare di θ .

Come in precedenza, l'affidabilità di misurazione della sonda è sostanzialmente indipendente dalla variazione dell'angolo θ , come visibile dal grafico di figura 33.

A partire dalle considerazioni appena effettuate, la sonda Aeroprobe Omniprobe si è rivelata essere un ottimo strumento di misurazione, capace di fornire risultati più che soddisfacenti in tutte le condizioni di incidenza del vettore velocità del vento ed in tutte le condizioni analizzate. In figura 34 sono riportate le singole iso-velocità.



Figura 34: Intensità misurata dall'Omniprobe al variare di θ a (a) 10Hz, (b) 15Hz, (c) 20Hz, (d) 25Hz, (e) 30Hz, (f) 35Hz.

9. Conclusioni

Al termine dello studio svolto sulla sonda Omniprobe Aeroprobe siamo riusciti a valutare in maniera esaustiva il suo corretto funzionamento. Essa ha infatti mostrato una buona risposta nella rilevazione dell'intensità presentando differenze percentuali inferiori al 4 % rispetto ai valori forniti dalla sonda Cobra.

Il dispositivo testato ha inoltre fornito valori più che accettabili nel confronto tra gli angoli attesi dalla conoscenza del posizionamento della stessa e quelli rilevati. In questo caso le differenze tra le due matrici di angoli non hanno mai mostrato cifre superiori alla decina di gradi, restando mediamente intorno ai 4 gradi.

Si è inoltre verificato come l'andamento dell'intensità non sia particolarmente influenzato dall'orientazione relativa sonda-vento: come si può apprezzare osservando la tabella 10, essa non ammette, al variare delle angolazioni, variazioni superiori a 0,5 m/s che possono essere giustificati da una modesta anisotropia dello strumento, la quale rimane comunque contenuta entro limiti più che accettabili.

Lo strumento testato risulta essere quindi efficace e tecnologicamente innovativo e il suo corretto funzionamento rappresenta la possibilità di potere utilizzare questo dispositivo in maniera autonoma, sia in galleria del vento che in misure esterne.

La sonda rimane quindi estremamente utile in campo meccanico, aeronautico e civile, per apprezzare i comportamenti di un fluido in prossimità di spigoli vivi e vertici, tipici di edifici e infrastrutture, profili alari e palette.

Appendice A – La galleria del vento DICCA

La galleria del vento della scuola Politecnica dell'Università di Genova, situata presso il laboratorio del DICCA [8], è un impianto a circuito chiuso (Figura 1) realizzato in carpenteria metallica, il cui ingombro in pianta è di 8x21 m². La tipologia a circuito chiuso (Figura 2) ha l'effetto di migliorare la qualità del flusso (rispetto agli impianti a circuito aperto) e il vantaggio di operare con una camera di prova a pressione ambiente. La galleria presenta alcuni aspetti innovativi per quanto concerne lo schema generale e i parametri dimensionali e prestazionali. La Tabella 1 e la Tabella 2 riportano sinteticamente le dimensioni principali e le prestazioni dell'impianto. I paragrafi seguenti illustrano i componenti dell'impianto suddivisi per tipologia.



Figura 35: Vista dall'alto dell'impianto



Figura 36: Vista laterale dell'impianto

Validazione sperimentale in galleria del vento di sonda di velocità multiforo – Pastore F. & Bella L.



Figura 37:Planimetria dell'impianto e sua collocazione all'interno del laboratorio

Tabella 1: Dimensioni principali dell'impianto.

Dimensioni:

Larghezza (m)	8
Lunghezza (m)	21
Altezza (m)	3.5
	1.7 x
Sezione camera di prova (m)	1.35
Lunghezza camera di prova	
(m)	8.8
Rapporto di contrazione	5
Diametro del Ventilatore (m)	2.2



Prestazioni:

Velocità di progetto camera di prova (m/s)	30
Velocità massima camera di prova (m/s)	40
Potenza necessaria a 40 m/s (kW)	100
Potenza istallata (kW)	132
Perdita di potenza dell'impianto (Power fac-	
tor)	0.774

Camera di prova e sezioni di misura

La camera di prova è lunga 8.8 m (Figura 4). La sezione trasversale della camera di prova è di 1.7 x 1.35 m². Al suo interno si collocano due distinte sezioni di misurazione.



Figura 38: Camera di prova: particolare del telaio di contrasto nella prima sezione di misura



Figura 39: Camera di prova: vista dall'interno

La prima sezione di misura, situata all'imbocco della camera, 1.5 m a valle del convergente, è rivolta a misure in flusso omogeneo. Di base, essa è caratterizzata da valori ridottissimi dell'indice di turbolenza; è comunque previsto l'impiego di griglie per creare, se necessario, flussi turbolenti.

La sezione è utilizzata soprattutto per prove aerodinamiche e aeroelastiche su modelli sezionali di elementi e porzioni strutturali quali impalcati da ponte, conci di torre o componenti di costruzioni industriali.

La seconda sezione di misura, nella parte terminale della camera di prova, è dotata di una tavola rotante ed è rivolta a misure in condizioni di flusso tali da riprodurre le proprietà dello strato limite atmosferico mediante generazione artificiale del profilo della velocità media e della struttura della turbolenza, compatibilmente con le dimensioni della sezione e i rapporti di scala che si renderanno di volta in volta opportuni. Lo sviluppo dello strato limite, favorito mediante dispositivi passivi (blocchi di rugosità e guglie), è favorito dalla lunghezza della camera di prova. La parte terminale, prima del primo angolo, è posta in comunicazione con l'ambiente mediante un setto poroso che ha il compito di equalizzare la pressione statica Il riequi-librio della pressione statica è inoltre favorito dalla presenza di una fessura longitudinale, anch'essa porosa, lungo tutto il soffitto della camera di prova.

Gruppo motore

Immediatamente dopo il primo divergente e il secondo angolo, a valle del cambio di forma da sezione rettangolare a sezione circolare, si trova il ventilatore (Figura 6). Il ventilatore (assiale) ha una girante di 2.2 m ed è alimentato da un motore asincrono da 132 kW collocato in posizione anteriore e protetto da un'ogiva. La potenza installata è stata dimensionata in base alla valutazione delle perdite di carico dell'impianto, con lo scopo di attuare in camera di prova una velocità superiore a 40 m/s, assumendo un rendimento complessivo del ventilatore pari a 0.7. Il ventilatore, il motore ed il raddrizzatore di flusso (statore), sono collocati su un basamento in acciaio mediante silent-blocks (Figura 5); il basamento è ancorato mediante tirafondi a una fondazione rigida in calcestruzzo armato, isolata dal resto della pavimentazione.



Figura 40: Vista del ventilatore dal cambio di forma a monte



Figura 41: Vista del basamento su fondazione rigida

Il ventilatore, la cui velocità massima è di 900 giri/minuto, è comandato da un convertitore in frequenza che permette di regolare con continuità la velocità in camera di prova con precisione pari a ± 0.1 m/s; il suo raffreddamento è ad aria, ed è affidato a un ventilatore centrifugo ausiliario collocato all'esterno della galleria. Il blocco motore è meccanicamente isolato dai cambi di forma, tanto a monte quanto a valle, mediante giunti elastici che impediscono la trasmissione di vibrazioni alle altre sezioni della galleria del vento.

Divergenti

Per aumentare la lunghezza della camera di prova, non è stato collocato alcun divergente a valle della seconda sezione di misura. Il primo diffusore, della lunghezza di 1.65 m, è successivo al primo angolo ed è realizzato con un divergente bidimensionale con un angolo massimo di 3°, ottenuto con un setto orizzontale divisorio (Figura 8-a). A valle del ventilatore, dopo il raddrizzatore di flusso e il cambio di forma, si trova il secondo canale di espansione (Figura 8-b-c) di lunghezza pari a 8.9 m; esso è completamente foderato di materiale fonoassorbente ed è caratterizzato da un angolo di divergenza massimo di 3.3°. Tra il terzo e il quarto angolo si trova infine un modesto diffusore che funge principalmente da elemento di raccordo tra gli angoli.



Figura 42: Primo divergente e, sullo sfondo il secondo angolo (a), vista del ventilatore (b) e del terzo angolo (c)

Angoli

Per ottimizzare gli ingombri e massimizzare la lunghezza della camera di prova, non sono stati posti in opera divergenti rapidi, tanto a monte della camera di ristagno, quanto a valle della camera di prova. Gli angoli sono stati quindi progettati in modo innovativo, dando luogo a un'espansione del flusso. In ciascuno dei quattro angoli si trova una batteria di alette con interasse di 81 mm. Per minimizzare la separazione e ridurre quanto più è possibile le perdite di carico, le alette sono state realizzate con profili alari studiati appositamente per l'uso in galleria del vento; essi sono caratterizzati da un'elevata curvatura e da una rifinitura a spigolo vivo al bordo d'uscita. L'interasse tra le alette è il compromesso ottimale tra la necessità di evitare la separazione (alette troppo distanziate potrebbero indurre lievi separazioni al bordo d'uscita) e di non aumentare eccessivamente la resistenza di attrito (legata alla superficie bagnata delle alette).

Camera di calma e convergente

All'uscita del quarto angolo, nella camera di calma, sono alloggiati una struttura a nido d'ape e un sistema di cinque reti. Essi attuano una progressiva riduzione delle scale della turbolenza concorrendo, assieme agli accorgimenti utilizzati nel dimensionamento dei divergenti e degli angoli, a garantire un'elevata qualità del flusso prima del suo ingresso in camera di prova. L'honeycomb e le reti, realizzate senza alcuna discontinuità, sono state calate dall'alto attraverso una botola nel soffitto (Figura 9-a). La maglia dell'honeycomb ha dimensione M pari a 6.35 mm; la batteria di reti è a maglia decrescente, variabile da 3.2 a 0.7 mm. La Tabella 3 riporta le dimensioni principali caratterizzanti gli schermi: d è il diametro degli elementi, M è la dimensione caratteristica della maglia, $\hat{=}(1-d/M)^2$ è il rapporto di solidità.



Figura 43: Installazione del pannello a nido d'ape e delle reti (a); vista del convergente e della prima sezione di misura (b)

Ele- mento	d (mm)	M (mm)	^
honey- comb	0.1	6.35	0.97
Rete 1	0.71	3.2	0.61
Rete 2	0.56	2.4	0.58
Rete 3	0.56	2.4	0.58
Rete 4	0.16	0.7	0.61
Rete 5	0.16	0.7	0.61

Tabella 3 Dimensioni dell'honeycomb e delle reti: diametro d, larghezza della maglia M, rapporto di solidità ^

A valle delle reti si colloca la camera di calma; essa ha il compito di ristabilire nel flusso un regime di turbolenza isotropa, prima che questo giunga nel convergente. Il convergente (Figura 9-b), dimensionato per evitare fenomeni di separazione o ispessimento indesiderato dello strato limite, ha un fattore di contrazione pari a 5.

Caratterizzazione e modellazione dell'impianto

In fase progettuale, ogni singolo componente dell'impianto è stato oggetto di analisi finalizzate a verificarne il corretto dimensionamento. Dal punto di vista fluidodinamico, particolare attenzione è stata posta nella verifica delle perdite di carico che si realizzano nelle diverse sezioni. La Tabella 4 riporta, per tutti i componenti dell'impianto, l'area della sezione, la velocità corrispondente a una velocità di 40 m/s in camera di prova, e i coefficienti di perdita locali e cumulativi; essi forniscono il valore della potenza installata necessari Al fine di evitare qualsivoglia sottodimensionamento, le perdite di carico sono state valutate ipotizzando la presenza di uno scambiatore di calore (non installato allo stato attuale).

	A roo	Velocità	Coefficier	nte di perdita
Sezione	(m ²)	ingresso (m/s)	locale	Cumulativo
Camera di Prova	2.375	40	0.0520	0.0520
Primo angolo	2.375	39.33	0.0480	0.1000
Primo Diffusore	3.222	39.33	0.0455	0.1455
Secondo angolo	3.222	28.99	0.0480	0.1935
Ventilatore	3.98	28.99	0.1520	0.3455
Secondo diffusore	6.716	23.47	0.0184	0.3639
Scambiatore di calore	6.716	-	0.1000	0.4639
Terzo angolo	8.662	13.92	0.0044	0.4683
Terzo diffusore	8.901	10.49	0.0005	0.4688
Quarto angolo	11.483	8.3	0.0025	0.4713
Honeycomb	11.483	-	0.0237	0.4950
Rete 1	11.483	-	0.0400	0.5350
Rete 2	11.483	-	0.0447	0.5797
Rete 3	11.483	-	0.0447	0.6244
Rete 4	11.483	-	0.0535	0.6779
Rete 5	11.483	8.3	0.0535	0.7314
Camera di calma	11.483	8.13	0.0004	0.7317
Convergente	2.295	41.4	0.0420	0.7737

Tabella 4: Proprietà delle sezioni dell'impianto, velocità relative alla velocità in camera di prova e coefficienti di perdita.

10. Riferimenti bibliografici

[1]: <u>http://www.pixsys.net/it/approfondimenti/sensori-di-pressione</u> Giugno 2017

http://it.omega.com/prodinfo/trasduttori-di-pressione.html Giugno 2017

http://www.wika.it/landingpage pressure sensor it it.WIKA Giugno 2017

- [2]: https://it.wikipedia.org/wiki/Tubo di Pitot Giugno 2017
- [3]: Francesca Satta, Dispense di Turbomacchine per l'Energia e la Propulsione Aerea, a.a. 2016-2017
- [4]: <u>http://www.chell.co.uk/pressure/motorsport/multi-hole-probe/aeroprobe-ps12---pl12-</u> <u>Omniprobe</u> Luglio 2017

https://www.chell.co.uk/phpmedia/docs/omniprobe-data-sheet.pdf Luglio 2017

http://produkte.althen.de/public/media/PDF_Datenblatt/1a_Druckmesstechnik/de/Omniprobes-staudrucksonden-en.pdf_Luglio 2017

https://www.aeroprobe.com/omniprobe/ Luglio 2017

- [5]: <u>https://www.turbulentflow.com.au/Products/CobraProbe/CobraProbe.php</u> Agosto 2017
- [6]: Aeroprobe Corporation, AeroFlow 2, Product Manual v2.7.0 Aprile 2014
- [7]: Franco Bampi-Mauro Benati-Angelo Morro, Problemi di Meccanica Razionale, ECIG, 1988
- [8]: A. Freda, Università di Genova, DICCA, Wind tunnel description