

**ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITA' DI BOLOGNA**

SCUOLA DI INGEGNERIA

Sede di Forlì

Corso di Laurea in
INGEGNERIA AEROSPAZIALE

Classe L-9

ELABORATO FINALE DI LAUREA

In: Aerodinamica degli Aeromobili

**Realizzazione in stampa 3D e calibrazione
attraverso procedura semplificata di una sonda a 5
fori**

CANDIDATO:

Niccoló Carioli

RELATORE:

Prof. Alessandro Talamelli

CORRELATORE:

Dott. Lorenzo Lazzarini

Anno Accademico 2021/2022

Con questo lavoro si conclude un percorso durato 3 anni.

Ringrazio innanzitutto il professor. Talamelli per l'opportunità datami e per la fiducia riposta in me.

Successivamente, un immenso grazie va a tutto lo staff di CICLoPE che mi ha sempre aiutato e sostenuto.

Un ringraziamento speciale lo dedico a tutte quelle persone che mi sono state vicine in questi anni, spronandomi a dare sempre il meglio e non lasciandomi mai solo.

Infine, ringrazio l'insicuro me stesso di 3 anni fa per non aver mai mollato.

Dedico tutto ciò ai miei genitori, che hanno creduto in me dal primo giorno e senza i quali nulla sarebbe stato possibile.

Spero di rendervi sempre orgogliosi di me.

Sommario

Nella presente tesi vengono descritti i procedimenti di costruzione, assemblaggio e di calibrazione di un tubo di Pitot a 5 fori. Si è cercata una soluzione costruttiva che fosse facilmente replicabile e modificabile, mantenendo una buona affidabilità. Inoltre si è testato un nuovo tipo di calibrazione che permettesse di ridurre notevolmente i tempi di attesa per l'acquisizione dati. Vengono poi presentati i risultati ottenuti dalla calibrazione, fornendo infine commenti e consigli per migliorare l'intera procedura e ridurre l'errore.

Indice

Introduzione	1
1 Teoria	3
1.1 Caratterizzazione di un flusso	3
1.2 Teorema di Bernoulli	4
1.3 Catena di misurazione	5
1.4 Misure di pressione	7
1.5 Strumenti	9
1.5.1 Tubo di Pitot	9
1.5.2 Presa statica	10
1.5.3 Tubo di Pitot alla Prandtl	11
1.6 Misure di angolarità del flusso	11
1.6.1 Tubo di Pitot a 3 fori	12
1.6.2 Tubo di Pitot a 5 fori	13
2 Costruzione sonda	15
2.1 Design	15
2.2 Testa	16
2.2.1 Prototipo A	16
2.2.2 Prototipo B	19
2.2.3 Prototipo C	19
2.3 Assemblaggio	21
3 Calibrazione	24
3.1 Metodi operativi	24
3.2 Calibrazione	25

3.2.1	Coefficienti adimensionali	26
3.2.2	Mappe di calibrazione	28
3.2.3	Effetto del numero di Reynolds e del numero di Mach	30
3.3	Calibrazione semplificata	31
3.3.1	Programma MATLAB	35
4	Setup sperimentale	40
4.1	Galleria del vento piana	40
4.2	Sistema di movimentazione	42
4.3	Elaborazione dei dati	44
4.3.1	Sensori	44
4.3.2	Trasduttori	46
4.3.3	Trasmissione dati	47
4.4	Visualizzazione e controllo	47
5	Risultati	49
6	Conclusioni	57
A	Getto piano	58
	Elenco delle figure	61
	Bibliografia	64

Lista dei Simboli

α	Angolo di beccheggio
β	Angolo di imbardata
ρ	Densità
\vec{V}	Vettore velocità
$C_{p\alpha}$	Coefficiente di pressione di beccheggio
$C_{p\beta}$	Coefficiente di pressione di imbardata
C_{ps}	Coefficiente di pressione statica
C_{pt}	Coefficiente di pressione totale
P_s	Pressione statica
P_t	Pressione totale
a	Velocità del suono
M	Numero di Mach
P	Pressione
R	Costante specifica del gas
Re	Numero di Reynolds
T	Temperatura

Introduzione

Grazie alle odierne tecnologie, in particolare grazie allo sviluppo di trasduttori di pressione miniaturizzati, computer molto potenti e software avanzati, le sonde a multiforo (MHP) rappresentano un'alternativa molto valida a tecniche più sofisticate come l'HWA (Hot Wire Anemometry), LDV (Laser-Doppler Velocimetry) o PIV (Particle-Image Velocimetry). Ad oggi le MHP competono con gli altri strumenti a disposizione per la misurazione del campo di moto in quanto sono facili da usare, sono tecnologie robuste e ben consolidate, affidabili e poco costose, tutte caratteristiche che le rendono allettanti a ricercatori e ingegneri. Il design delle moderne sonde a multiforo si basa sul principio di funzionamento del tubo di Pitot alla Prandtl. Le MHP sono una tecnologia che permette la risoluzione di campi di moto stazionari tridimensionali. In passato il problema di queste sonde era l'impossibilità di misurare la pressione all'interno del campo di moto. Tuttavia le sonde odierne, propriamente calibrate, possono fornire non solo tutte e tre le componenti della velocità, ma anche la pressione sia statica sia dinamica, e, in alcuni casi, anche la temperatura statica e totale, arrivando addirittura in particolari applicazioni alla composizione del fluido nelle quali sono collocate. Esistono varie tipologie di MHP, esse si differenziano per la forma della testa, la frequenza di acquisizione o le temperature operative. Le MHP vengono usate, ad esempio, nelle gallerie del vento, dove la loro funzione principale è quella di calibrare la galleria registrando l'uniformità del flusso nella sezione di prova, oppure possono essere usate per mappare il campo di velocità attorno a modelli aerodinamici. Inoltre possono essere impiegate per generare dei dati in un griglia nella scia di un modello di aeromobile per poter stimare la resistenza e la portanza generata, come anche l'intensità

dei vortici di estremità. Le MHP vengono anche usate per esplorare il flusso attorno a modelli di automobile. Possono perfino arrivare ad essere utilizzate in applicazioni di turbomacchine, evidenziando le proprietà del flusso all'uscita dell'elica di un motore a turbina, tra i vari stadi del compressore e addirittura nella zona di scarico. In questo caso MHP ad alta frequenza e ad alta temperatura risultano essere molto utili. Le MHP hanno numerose applicazioni anche in ingegneria eolica, per monitorare la direzione e l'intensità del vento. Tuttavia la più importante applicazione pratica risulta essere la determinazione dell'assetto di beccheggio e imbardata di un aeromobile. In questo caso le MHP prendono il nome di "air-data probe". Le applicazioni delle MHP sono numerose, in qualunque caso sia necessario conoscere le tre componenti della velocità le MHP trovano impiego. Lo scopo della seguente tesi è quello di portare a termine la costruzione e la successiva calibrazione di un particolare tipo di MHP, il tubo di Pitot a 5 fori. In particolare si esplora un metodo costruttivo che risulta essere di semplice fabbricazione e riproduzione, grazie a tecnologie di additive manufacturing. Per la calibrazione viene invece testata una procedura semplificata, in grado di ridurre notevolmente i tempi per l'acquisizione dei dati. In primo luogo si discute della teoria dietro ai tubi di Pitot a 5 fori, del loro principio di funzionamento e della loro calibrazione per permettere al lettore di capire quanto semplici ma efficaci siano questi strumenti. Viene poi presentato il metodo di costruzione e l'idea della calibrazione semplificata entrando nel dettaglio dell'implementazione Matlab per la verifica di questa idea. La seguente teoria viene poi implementata nell'effettiva calibrazione di un tubo di Pitot a 5 fori e i risultati vengono riportati con commenti critici e consigli su come migliorare l'intera procedura. La costruzione e la calibrazione di un tubo di Pitot a 5 fori risulta essere molto interessante in quanto fornisce uno strumento molto versatile e pronto all'uso, che può essere usato per futuri esperimenti nella galleria del vento CICLoPE.

Capitolo 1

Teoria

1.1 Caratterizzazione di un flusso

Si prenda in considerazione un generico flusso; esso può essere descritto, grazie alle equazioni di Navier-Stokes, in ogni punto dello spazio e in ogni istante di tempo, a patto che siano note la densità, la temperatura, la pressione e la velocità, sia in modulo sia in direzione. Per quanto riguarda la densità, la sua misurazione risulta impossibile per la maggior parte dei flussi, come riporta [1]. Inoltre, è possibile dimostrare che, per velocità sufficientemente basse, la variazione percentuale di densità rimane confinata entro un certo limite e può essere considerata come costante. In particolare, se si definisce il numero di Mach come $M = v/a$, per valori di $M \leq 0.3$ la variazione percentuale della densità rimane confinata entro il 5%. Se queste condizioni risultano essere verificate allora il flusso si può definire incomprimibile, e la densità può essere ricavata da (1.1), una volta note temperatura e pressione. Siccome nel caso discusso in questa tesi la velocità rimane ampiamente sotto il limite, la densità verrà considerata sempre come costante e nota.

$$P = \rho \cdot R \cdot T \rightarrow \rho = \frac{P}{R \cdot T} \quad (1.1)$$

La velocità può essere invece ricavata partendo da misure di pressione, grazie all'equazione di Bernoulli, come verrà spiegato nella sezione 1.2.

Questo ci fa intuire che, in realtà, per caratterizzare completamente un flus-

so, è solamente richiesta la conoscenza della pressione e della temperatura. In questa tesi si affronteranno solo le misure di pressione.

1.2 Teorema di Bernoulli

Il teorema di Bernoulli, che deriva direttamente dalle equazioni di Navier-stokes, afferma che, preso un flusso che rispetta le ipotesi di:

- Flusso irrotazionale
- Flusso incomprimibile
- Forze di massa trascurabili
- Flusso stazionario

Allora in tutto il campo di moto vale che:

$$P_s + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 = Cost = P_t \quad (1.2)$$

La pressione totale, P_t , è quella pressione che il flusso avrebbe se lo si portasse isoentropicamente, cioè senza perdite, a velocità nulla.

La pressione statica, P_s , è invece la pressione che è presente localmente nel flusso.

Il termine $\frac{1}{2}\rho U^2$ prende il nome di pressione dinamica.

Il teorema di Bernoulli, quindi, ci assicura che, per un flusso che rispetta le ipotesi sopraelencate, la pressione totale si conserva.

Questo teorema ci permette di calcolare la velocità a partire da misure di pressione totale e pressione statica, a patto che la densità sia nota. Come riportato nella sezione 1.1, per il caso preso in questione, la densità è da considerarsi nota, per cui vale che:

$$U = \sqrt{\frac{2 \cdot (P_t - P_s)}{\rho}} \quad (1.3)$$

Così facendo è possibile calcolare quindi il modulo della velocità. Per risalire alle 3 componenti di essa, sono richiesti almeno 2 angoli.

1.3 Catena di misurazione

Prima di descrivere come possono essere eseguite le misure di pressione è necessario introdurre la catena di misurazione e i suoi elementi.

Si può definire catena di misurazione l'insieme degli elementi e strumenti necessari per prelevare, trasportare e leggere un segnale. Solitamente essa è costituita da diversi elementi: sensore, trasduttori e sistema di acquisizione dati.

Il sensore è quell'elemento in grado di catturare un segnale reale. Esso può essere un elemento che cambia un proprio stato quando si trova in contatto con la grandezza da misurare oppure, come vedremo successivamente, anche un semplice orifizio. Ogni sensore possiede determinate caratteristiche, le principali sono:

- Risoluzione spaziale e temporale: la prima è la misura più piccola effettuabile mentre la seconda è l'intervallo di tempo più piccolo che può intercorrere tra una misura e l'altra.
- Accuratezza: rappresenta l'errore che ci si deve aspettare dalla lettura dello strumento, solitamente indicata come una percentuale rispetto al fondo scala.
- Intrusività: rappresenta quanto il sensore disturbi con la sua presenza le misure stesse da eseguire (molto importante nelle misure di pressione).
- Robustezza: rappresenta quanto il sensore sia robusto a danni nel tempo o per interazione con sporcizia.
- Costo.

Il trasduttore è invece quell'elemento che trasforma il segnale in uscita dal sensore in qualcosa che è possibile leggere. Per quanto riguarda i trasduttori di pressione, ricevono in ingresso la pressione misurata dal sensore e una pressione di riferimento. A seconda della pressione ricevuta come riferimento possono esistere diversi tipi di trasduttori. In particolare si possono avere:

- Trasduttori di pressione assoluti: la pressione di riferimento è il vuoto.
- Trasduttori di pressione relativa: la pressione di riferimento è la pressione atmosferica.
- Trasduttori di pressione differenziali: la pressione di riferimento è un'altra pressione diversa sia dalla pressione atmosferica sia dal vuoto.

Inoltre a seconda del tipo di output che i trasduttori danno possono differenziarsi in:

- Trasduttori: se l'uscita è un segnale elettronico.
- Manometri: se l'uscita è una altezza di colonna di liquido.

I manometri infatti sono dei tubi, solitamente di vetro, che vengono parzialmente riempiti con del liquido. Se una pressione esterna viene fatta entrare nel tubo, il liquido all'interno tenderà ad occupare più o meno spazio, permettendo, attraverso una griglia, la misurazione della variazione della sua altezza, risalendo così alla pressione. Un esempio è mostrato in figura 1.1.

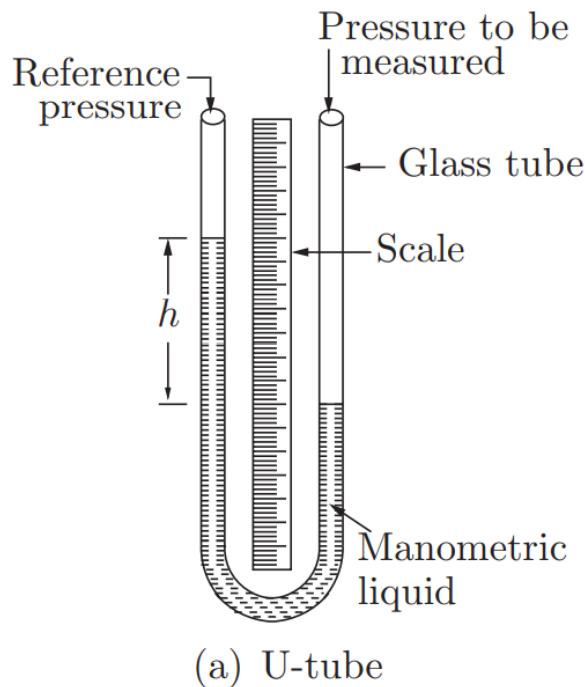


Figura 1.1: Manometro ad U [1].

I trasduttori invece, si avvalgono di circuiti elettrici per misurare la pressione e restituire come output una tensione. I trasduttori sono solitamente i più usati, tuttavia necessitano di un sistema di acquisizione dati per riottenere una misura di pressione da un dato in tensione.

Nel sistema di acquisizione dati, solitamente, il segnale elettrico viene prima ripulito da eventuali rumori presenti nella misura, dopodiché amplificato e offsettato, in modo da poter essere inserito e analizzato nella maniera più ottimale possibile.



Figura 1.2: Trasduttore elettrico.

1.4 Misure di pressione

Le misure di pressione sono quindi fondamentali per la caratterizzazione di un flusso. L'equazione di Bernoulli ci assicura che la pressione totale si conservi, questo vuol dire che durante l'interazione corpo-fluido sarà presente un continuo scambio tra pressione statica e pressione dinamica. Infatti quando un flusso incontra un corpo, per interazioni che dipendono solamente dalla geometria del corpo, in certe zone esso tenderà ad accelerare

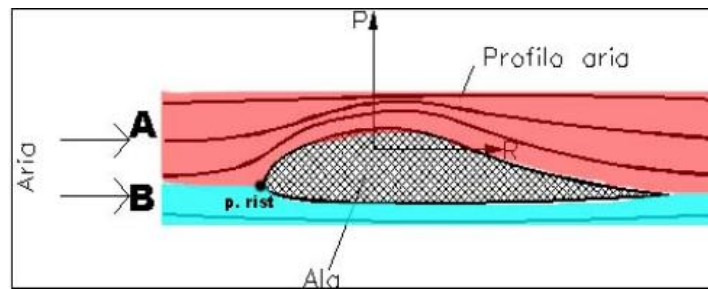


Figura 1.3: Rappresentazione del flusso attorno ad un profilo non simmetrico. Il pallino rappresenta il punto di ristagno, la zona rossa è la zona di depressione mentre la zona blu è la zona di sovrappressione [2].

creando zone di depressione, in altre zone invece il fluido tenderà a rallentare creando parti di sovrappressione.

Il punto nel quale la velocità è uguale a 0, e quindi pressione statica e totale coincidono, prende il nome di punto di ristagno.

Risulta quindi immediata la misura della pressione totale. È infatti sufficiente inserire un corpo all'interno del flusso, localizzare il punto di ristagno ed eseguire un orifizio in corrispondenza di esso. Così facendo è possibile prelevare l'informazione di pressione, prelevando una porzione del flusso, e portarla direttamente al trasduttore in modo da poterla leggere.

Per quanto riguarda la pressione statica essa risulta più difficile da misurare. Quella che è di interesse è la pressione statica imperturbata, per questo è necessario misurare la pressione in punti nei quali la perturbazione risulta essere minima. Teoricamente basterebbe eseguire un orifizio in una zona imperturbata e collegarlo ad un trasduttore. Tuttavia nella realtà questo non è possibile in quanto fenomeni di disturbo dati da gradienti di pressione saranno sempre presenti. Questo perché come spiegato precedentemente, durante l'interazione flusso-corpo, il corpo stesso provoca dei disturbi sul flusso che fanno variare la pressione statica localmente, generando quelli che vengono chiamati gradienti di pressione.

1.5 Strumenti

1.5.1 Tubo di Pitot

Lo strumento per la misura della pressione totale prende il nome di tubo di Pitot. Esso è un semplice tubo con l'estremità aperta a punta che è diretta verso la direzione del flusso. Come riporta [1] solitamente questo tipo di strumento presenta un rapporto tra diametro interno ed esterno di $1/2$ o $3/4$ e una lunghezza allineata con il flusso da 15 a 20 diametri esterni. Un esempio è riportato in figura 1.4.

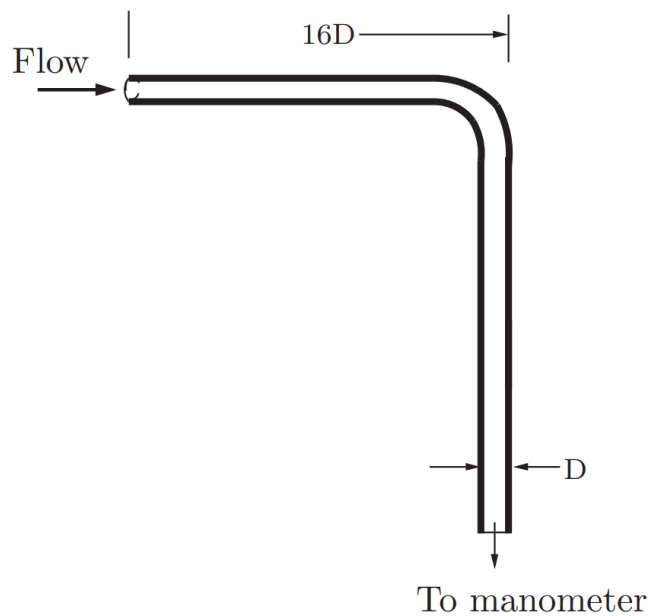


Figura 1.4: Tubo di Pitot [1].

É sperimentalmente verificato che la misura effettuata da un tubo di Pitot ben allineato risulta essere uguale alla pressione totale, a meno che non si stia considerando flussi a basso numero di Reynolds, nei quali entrano in gioco fenomeni viscosi, o flussi supersonici, nei quali si genera un'onda d'urto subito prima dell'orifizio.

1.5.2 Presa statica

Per la misura della pressione statica si usa quello strumento che prende il nome di presa statica. Un tipico esempio è riportato in figura 1.5.

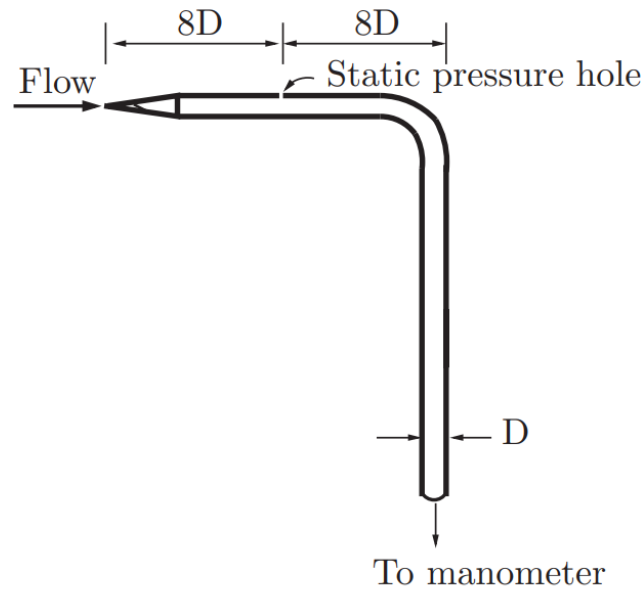


Figura 1.5: Sensore per pressione statica [1].

La forma della punta è tale da accelerare il flusso, ciò causa un decremento della pressione rispetto a quella indisturbata. Tuttavia, se la distanza dal naso aumenta, la pressione sul sensore tenderà a quella indisturbata. Vengono eseguiti orifizi perpendicolari all'asse del sensore, che prendono il nome di *prese statiche*. Questi vengono eseguiti ad una specifica distanza, solitamente 8 volte il diametro esterno della testa, questo perché, come riporta [1], risulta essere una distanza adeguata alla quale eseguire una misura che non risulti perturbata. Le misure di pressione statica risultano inoltre essere molto sensibili all'inclinazione della sonda all'interno del flusso. Inclinazioni oltre 5° comportano grandi errori. Per minimizzare questo errore solitamente vengono effettuate 4 prese statiche in direzioni perpendicolari tra loro.

1.5.3 Tubo di Pitot alla Prandtl

É possibile unire in unico strumento, che prende il nome di tubo di Pitot alla Prandtl, le misure di pressione statica e dinamica. Esso non è altro che un tubo di Pitot al quale vengono aggiunte una o più prese statiche. Un esempio è riportato in figura 1.6

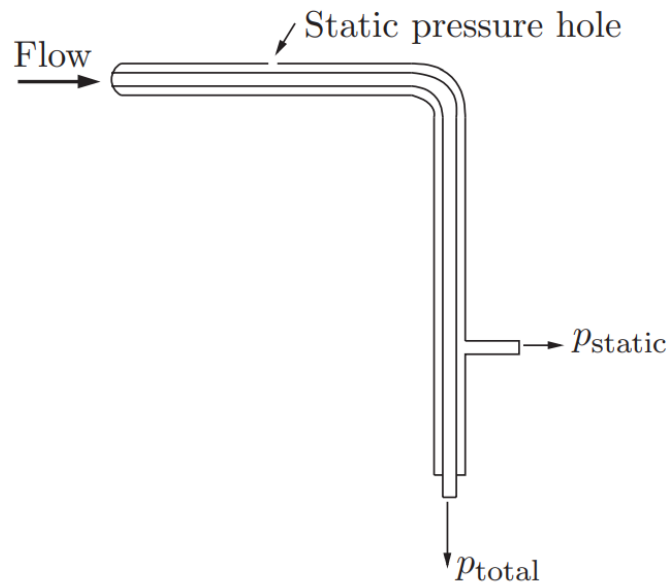


Figura 1.6: Tubo di Pitot alla Prandtl [1].

Questo strumento permette la misurazione diretta del modulo della velocità. Infatti, misurando sia la pressione totale sia la pressione statica, usando la (1.3), è possibile ricavare il modulo della velocità.

1.6 Misure di angolarità del flusso

Si è visto come sia possibile, utilizzando un solo strumento, risalire al modulo della velocità partendo da misure di pressione. Tuttavia, come accennato nella sezione 1.5.2, per effettuare misure il più corrette possibili, la sonda deve essere allineata con il flusso. Nella maggior parte dei casi però, la direzione della velocità non è nota a priori, quindi l'allineamento risulta difficile. Per risalire alla direzione della velocità, si possono usare quelli che vengono

chiamati tubi di Pitot a più fori. I più comuni sono i tubi di Pitot a 3 fori, che permettono di risalire a 2 su 3 componenti della velocità e i tubi di Pitot a 5 fori, che permettono di risalire a tutte le componenti della velocità. Ultimamente si stanno sviluppando tubi di Pitot a 7 o più fori che permettono di risalire a tutte le componenti di velocità fino anche a grandi angoli di incidenza. Il principio di funzionamento di questi strumenti risulta molto facile. Infatti essi vengono costruiti con tubi che risultano inclinati rispetto all'asse dello strumento, in modo tale che se il flusso non risulta perfettamente allineato con l'asse, i vari orifizi sentiranno una maggiore o minore pressione a seconda della loro posizione relativa alla velocità. Grazie a queste misure di pressione è possibile risalire alla direzione della velocità.

1.6.1 Tubo di Pitot a 3 fori

Il tubo di Pitot a 3 fori è uno strumento composto a 3 tubi, dove i due esterni presentano orifizi tagliati e inclinati di 45 gradi rispetto all'asse dello strumento, un esempio è riportato in figura 1.7.



Figura 1.7: Tubo di Pitot a 3 fori.

I tubi di Pitot a 3 fori trovano il loro utilizzo in applicazioni dove il flusso preso in considerazione può essere approssimato come bidimensionale. Infatti, il sensore dà la possibilità di misurare l'angolo di imbardata e quindi di calcolare le due componenti della velocità sul piano di imbardata. Il funzionamento risulta molto intuitivo. Infatti se la direzione del flusso è perfettamente allineata all'asse del sensore, il foro centrale capterà la pressione totale, mentre i due fori esterni sentiranno una pressione uguale.

Se, invece, senza perdita di generalità, il flusso ha una maggiore incidenza sulla direzione destra, il foro a destra sentirà una maggiore pressione, mentre quello a sinistra una minore. Attraverso queste misure di pressione, è possibile risalire alla direzione di provenienza del flusso.

1.6.2 Tubo di Pitot a 5 fori

Il tubo di Pitot a 5 fori, nella sua forma più primitiva, viene usato per la misurazione di due angoli della velocità, l'angolo di beccheggio e quello di imbardata.

Trova impiego in applicazioni dove il flusso è da considerarsi tridimensionale e questo strumento permette di risalire agli angoli effettivi di provenienza del vettore velocità. Se usato in combinazione, almeno inizialmente, come verrà spiegato nella sezione 3.2, con un tubo di Pitot alla Prandtl, si ha la possibilità di risalire a tutte e 3 le componenti della velocità, come anche alla pressione statica e alla pressione dinamica. Il tubo di Pitot a 5 fori non è altro che l'estensione del tubo di Pitot a 3 fori, in modo da fornire un'informazione aggiuntiva per la caratterizzazione del flusso.

Tuttavia questo strumento permette letture accurate degli angoli se essi rimangono entro una certa soglia.

Come indicato da [3] questa soglia può essere posta a circa 35 gradi. Passata questa soglia infatti, fenomeni aerodinamici come quello della separazione entrano in gioco, sfasando completamente le letture di pressione dei fori e compromettendo la misura. Esistono una moltitudine di design per il corpo e la testa del tubo di Pitot. È infatti importante notare che la presenza stessa del tubo di Pitot all'interno del flusso genera disturbi che potrebbero compromettere le misure effettuate dallo stesso. I vari design mirano quindi a cercare di migliorare certi comportamenti piuttosto che altri. Ci sono infatti design costruttivi che limitano l'effetto dell'angolo di imbardata, oppure design che limitano l'intrusività del sensore cercando di limitare il più possibile i disturbi.

Altre soluzioni per la realizzazione di tubi di Pitot a 5 fori mirano a migliorare certe caratteristiche; possono esistere ad esempio tubi di Pitot a 5 fori

ad alta frequenza di acquisizione, che vengono costruiti con sistemi ottici. Questa particolare branca di costruzione trova particolare uso nelle applicazioni di turbomacchine. Altri modelli possono essere tubi di Pitot a 5 fori con alta resistenza alle temperature, che trovano impiego in studi di gas di scarico o in tutte quelle applicazioni dove le temperature sono estreme. In figura 1.8 sono riportate alcune soluzioni costruttive, in particolare si possono notare tubi di Pitot a 5 fori sferici, ad "L", a cobra e ad alta frequenza di acquisizione.

Per avere maggiori informazioni riguardo altre tipologie di sonde si consiglia di guardare [4] e [5]. I materiali solitamente utilizzati sono l'acciaio o il titanio. Per quanto riguarda le dimensioni del Tubo di Pitot, come lunghezza e diametro dei fori, si consiglia di guardare [1].

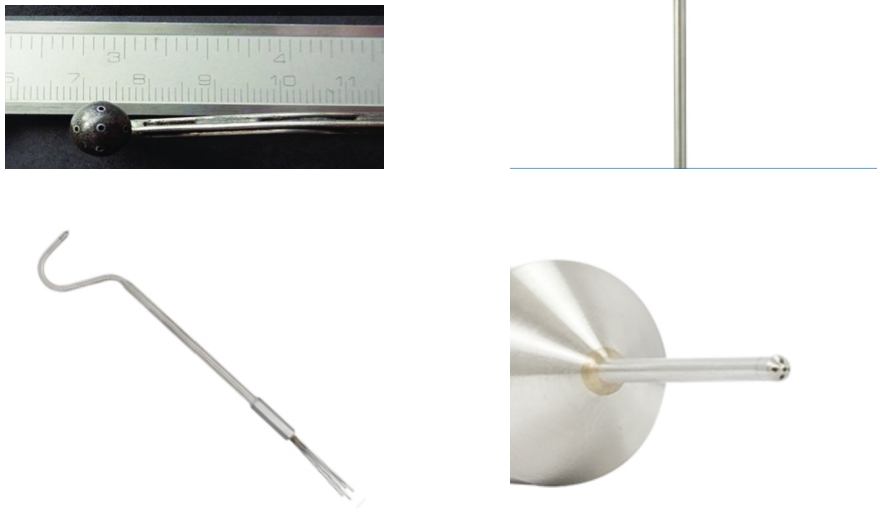


Figura 1.8: Da sinistra verso destra si possono vedere tubi di Pitot a 5 fori sferici, ad "L", a cobra e ad alta frequenza di acquisizione [1].

Capitolo 2

Costruzione sonda

2.1 Design

Tra gli infiniti design del tubo di Pitot a 5 fori, si è cercata una soluzione costruttiva che fosse semplice, innovativa e facilmente replicabile, per questo motivo si è deciso di scegliere un design dritto e di separare la testa, che è il core del funzionamento del sensore, dal resto del corpo.

I due pezzi verranno poi incollati insieme per rendere il loro collegamento saldo.

La testa verrà realizzata grazie alla tecnica di additive manufacturing, in modo da poter realizzare rapidamente e senza troppe spese, diversi modelli, mentre il supporto del sensore verrà realizzato in acciaio inossidabile.

I due componenti hanno funzionalità estremamente diverse, la testa è il vero e proprio sensore, infatti, presenta la classica forma di un Pitot a 5 fori e il suo compito è quello di prelevare il segnale in pressione, il quale verrà poi trasportato all'uscita del supporto grazie a microtubi in alluminio e verso il trasduttore con cavi in PLA.

Il supporto invece è responsabile sia dell'irrigidimento della sonda, in modo da garantire una zona molto resistente, grazie alla quale sarà possibile fissare la sonda sui meccanismi di movimentazione in modo saldo, evitando fenomeni di vibrazione, e senza rischiare rotture, sia dell'allontanamento della sonda dal supporto, in modo da evitare fenomeni di interferenza che possono causare errori nelle misure di pressione e sia della protezione dei

microtubi di alluminio. Le varie soluzioni costruttive vengono ora spiegate nel dettaglio.

2.2 Testa

Come anticipato, il core di tutta la costruzione, è la testa.

Essa viene realizzata secondo gli standard di un tubo di Pitot a 5 fori con testa a punta e corpo dritto

I vari prototipi sono disegnati su SOLIDWORKS e successivamente stampati in 3D.

Durante la realizzazione della testa, sono stati tenuti in considerazioni diversi fattori, primo fra tutti l'ingombro. Quello che si voleva ottenere era una sonda che fosse abbastanza grande per essere facilmente gestibile, ma non eccessivamente grande per evitare che la sonda stessa avesse troppa intrusività nel flusso e creasse errori nelle misure. Si è quindi cercato di mantenere le dimensioni il più ridotte possibile, in quanto, almeno in principio, non ci sono limitazioni, in termini di errore, nel diminuire la dimensione.

Tuttavia un limite sulla minima dimensione è imposto dalla precisione della stampante 3D. Infatti, la stampante 3D a disposizione, era in grado di realizzare fori completi solo per misure a partire da 0.8mm di diametro in su, mentre per diametri compresi tra 0.6 e 0.7 mm il foro risultava parzialmente riempito con materiale del processo costruttivo, mentre per diametri inferiori a 0.6 mm il foro risultava completamente chiuso.

Sono stati ideati e realizzati diversi tipi di testa, sia per dimensione sia che per forma, di seguito vengono presentati i vari modelli.

2.2.1 Prototipo A

Come prima scelta si è deciso di provare a realizzare la testa con dimensioni critiche per la stampante 3D, cioè con fori di diametro 0.7 mm e con un corpo perfettamente cilindrico.

Come anticipato questo ha portato i fori ad essere parzialmente pieni. Per questo motivo la testa è stata ripulita manualmente. Sono stati dapprima

usati fili di rame, i quali, venendo inseriti all'interno dei fori, hanno permesso l'estrazione del materiale in eccesso; successivamente il tutto è stato pulito in maniera più uniforme utilizzando un getto d'acqua in pressione, mostrato in figura 2.1.



Figura 2.1: Macchina usata per pulire i tubi di Pitot a 5 fori tramite un getto d'acqua in pressione.

Tuttavia, essendo questo processo manuale, non è da ritenersi completamente soddisfacente. Infatti la finitura superficiale interna, che si è in grado di ottenere con un processo manuale di questo tipo, è da considerarsi non ottima. Questo può portare a variazioni di diametro interno sulla lunghezza della testa che possono causare variazioni di velocità del segnale d'aria che viene ricevuto e di conseguenza letture errate di pressione.

Per fissare i microtubi di alluminio alla testa, è stata progettata un'apposita variazione di diametro dei fori, alla fine del corpo, in modo da poter alloggiare per incastro i microtubi. Dettagli del disegno costruttivo della sonda possono essere trovati alle figure 2.2, 2.3 e 2.4.

Per quanto riguarda le distanze tra i vari fori, o tra foro e bordo, esse sono state pensate in modo da non togliere rigidità alla stampa. Infatti se i fori

fossero stati eseguiti più vicini tra loro, il corpo sarebbe stato prevalentemente vuoto, cosa che avrebbe portato ad una perdita di robustezza. Le dimensioni finali della stampa sono riportate nella tabella 2.1.

ϕ_{foro} [mm]	<i>Distanza fori</i> [mm]	ϕ_{tot} [mm]	<i>Lunghezza</i> [mm]
0.6	0.5	3.8	30

Tabella 2.1: Dimensioni prototipo A.

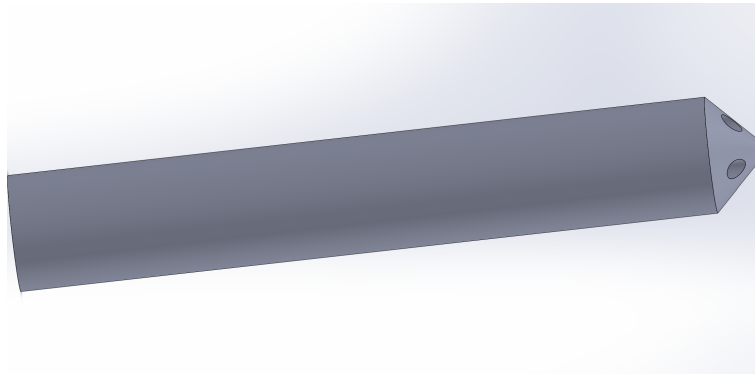


Figura 2.2: Pitot a 5 fori prototipo A.

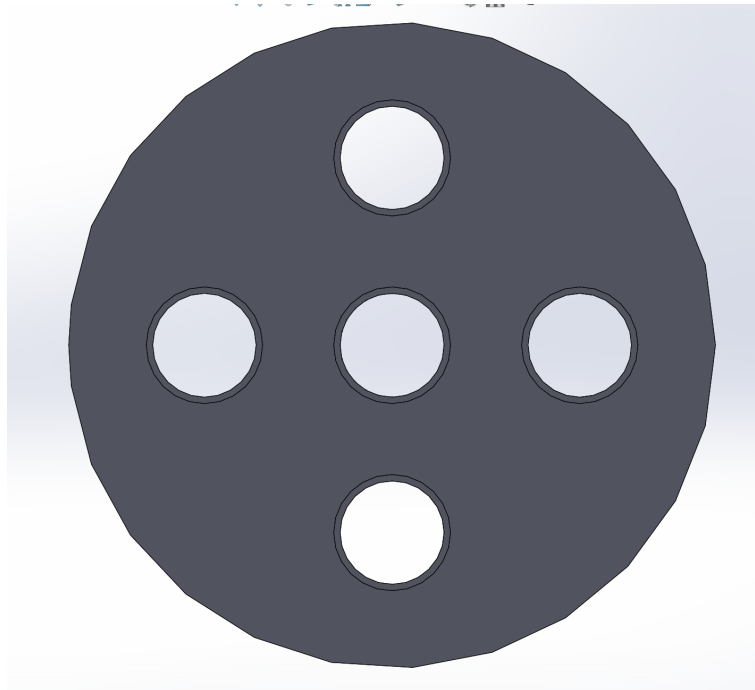


Figura 2.3: Vista frontale.

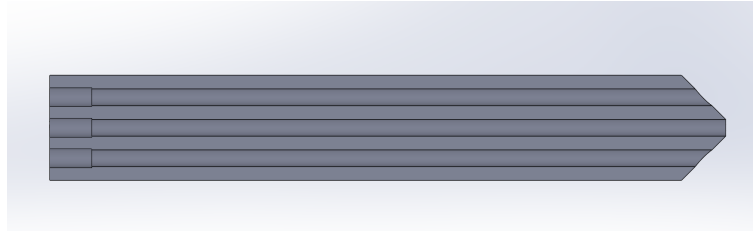


Figura 2.4: Vista in sezione.

2.2.2 Prototipo B

Successivamente lo stesso modello descritto in 2.2.1, è stato realizzato allargando i diametri dei fori.

Questo è stato fatto per evitare la pulizia manuale dei fori e quindi ottenere una finitura superficiale interna migliore, togliendo eventuali fonti di errore.

Le dimensioni del prototipo B sono riportate in tabella 2.2

$\phi_{foro}[mm]$	<i>Distanza fori</i> [mm]	$\phi_{tot}[mm]$	<i>Lunghezza</i> [mm]
0.8	0.65	5	30

Tabella 2.2: Dimensioni prototipo B.

Come si vede le dimensioni totali aumentano di circa il 44%, tuttavia rimangono comunque contenute per evitare fenomeni di intrusività del sensore.

2.2.3 Prototipo C

Come ultima soluzione si è pensato ad un design che facilitasse il fissaggio del supporto.

Questo consiste nel prendere il prototipo B, il quale verrà allungato di 10 cm e l'ultima parte allargata in modo da ottenere una zona di montaggio del supporto, come mostrato in figura 2.5 e 2.6.

La punta e l'incasso per i microtubi in alluminio rimangono presenti, semplicemente viene ingrossato il fondo per avere la possibilità di fissare in maniera più semplice il supporto in acciaio e per allontanare la testa del

sensore dal supporto, in modo da evitare fenomeni di bloccaggio. Il diametro dei fori rimane uguale, mentre la distanza dei fori viene scalata in modo da sfruttare in modo migliore il più ampio spazio a disposizione.

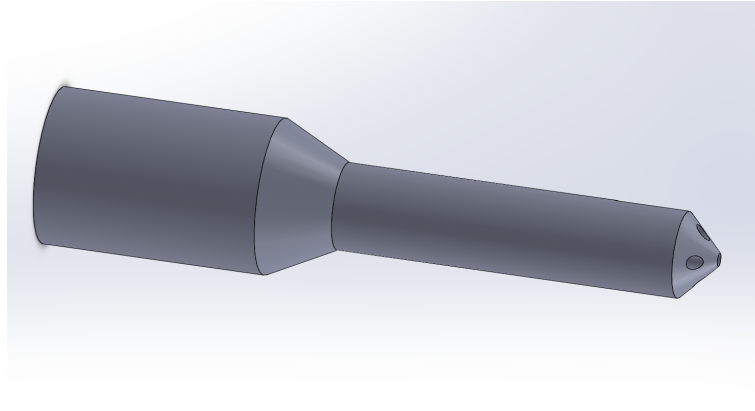


Figura 2.5: Pitot a 5 fori prototipo C.

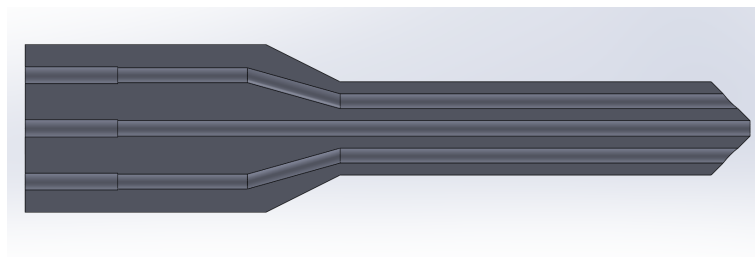


Figura 2.6: Vista in sezione.

Vengono di seguito riportare le foto della testa stampata in 3D.

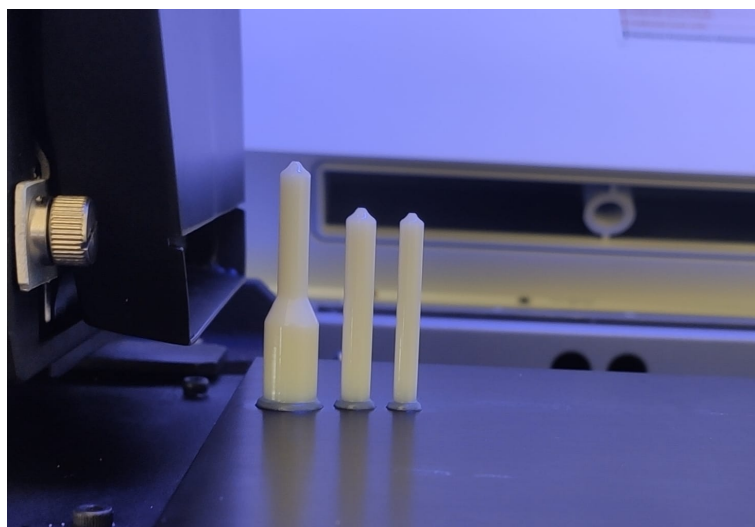


Figura 2.7: In ordine, da sinistra a destra, dal prototipo C a quello A.

2.3 Assemblaggio

Una volta ottenute le stampe della testa si può passare all'assemblaggio vero e proprio del sensore.

I microtubi in alluminio vengono tagliati e inseriti nella stampa 3D grazie all'incasso descritto prima.

Successivamente, il supporto in acciaio deve essere fissato alla testa. Questo è stato fatto grazie all'uso della pasta ceramica, che permette l'incollaggio delle due parti.

Durante la costruzione del prototipo A, che è stato il primo ad essere costruito, si è notato come, data l'elevata lunghezza, i microtubi in alluminio soffrano molto di instabilità a carico di punta.

Questa instabilità può portare i microtubi a flessione, o eventuale rottura, entrambi fenomeni che comprometterebbero la veridicità delle misure. Inoltre siccome i microtubi sono solo incastrati nel supporto stampato in 3D, se la flessione fosse troppa potrebbe addirittura rompersi la stampa, come è appunto successo con il prototipo A, avvenimento che ha portato il sensore ad essere inutilizzabile.

Per questi motivi nei successivi modelli si è cercato di rinforzare i microtubi prima di montare il supporto. Questo è stato fatto attraverso la creazione di incastri lungo tutta la lunghezza dei microtubi, ottenuti grazie a basi di cartone rinforzate con la pasta ceramica. Viene riportato in figura 2.8 il risultato di questo procedimento. In figura 2.9 viene invece riportato il design completo del prototipo B, che risulta essere la sonda meglio riuscita una volta finito l'assemblaggio completo. Tuttavia anche il prototipo di sonda di tipo C risulta perfettamente funzionante.

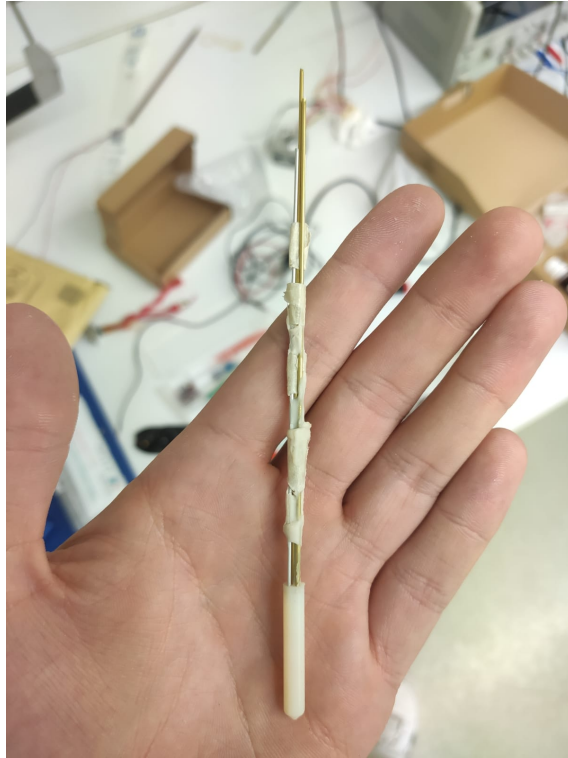


Figura 2.8: Rinforzo dei microtubi in alluminio per limitare effetti di instabilità di carico di punta.

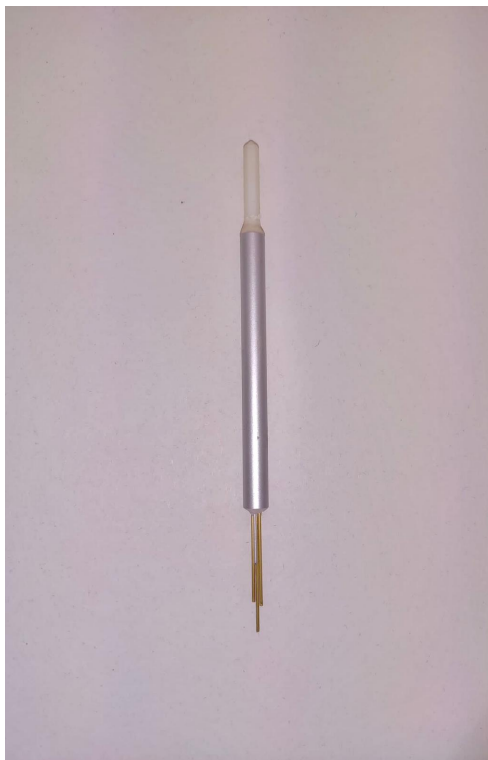


Figura 2.9: Design completo della sonda con il prototipo B della testa.



Figura 2.10: Altra vista della sonda completata.

Capitolo 3

Calibrazione

3.1 Metodi operativi

Il tubo di Pitot a 5 fori può essenzialmente essere usato in due maniere.

La prima prende il nome di *nulling technique*, o di *metodo a sonda rotante*, e consiste nell'inserire la sonda in un flusso incognito e, attraverso l'uso di un sofisticato cinematismo, muoverla nelle direzioni di beccheggio e di imbardata fino a che le 4 pressioni esterne non risultino uguali e il foro centrale misuri esattamente la pressione totale. Se questo risulta vero, vuol dire che la sonda è esattamente allineata con il flusso e conoscendo la posizione del cinematismo, è possibile risalire all'orientamento del flusso. Questo tipo di utilizzo richiede un meccanismo di controllo molto complesso a 5 gradi di libertà e può richiedere molto tempo. Infatti, la sonda deve essere mossa lungo le direzioni di beccheggio e di imbardata fino a che essa non risulti allineata con il flusso. Inoltre, se la sonda è piccola e presenta un tempo di risposta lento, il tutto può risultare ancora più dispendioso.

La seconda tecnica prende il nome di *non-nulling technique*, o di *metodo a sonda fissa*, e prevede il posizionamento della sonda in maniera fissa all'interno del flusso. Siccome non esiste una legge analitica che lega direttamente pressioni registrate con la posizione relativa tra flusso e sonda, essa deve essere prima calibrata. Tuttavia negli anni ci sono stati molti tentativi mirati a trovare una tecnica di approccio che fosse globale, come spiegato da [2], ma una calibrazione preliminare risulta sempre essere la soluzione mi-

gliore. Per la determinazione della direzione e dell'intensità della velocità quindi, la sonda viene prima sottoposta ad un'intensiva calibrazione, grazie alla quale vengono legate le misure di pressione con gli effettivi angoli di provenienza del flusso. Successivamente, le mappe di calibrazione ottenute vengono usate per ottenere la direzione del vettore velocità a partire dalle misure effettuate.

In questo tipo di applicazione si è scelto come metodo operativo quello della non-nulling technique, per questo ora si passa alla spiegazione della calibrazione.

3.2 Calibrazione

Solitamente la calibrazione avviene inserendo la sonda, affiancata da un tubo di Pitot alla Prandtl il quale è mantenuto fisso, in un flusso noto e facendola muovere secondo varie combinazioni dell'angolo di beccheggio, indicato con α , e di imbardata, indicato con β , e registrando le pressioni ottenute in ogni punto. Viene scelto un range di variabilità per i due angoli e il passo tra un valore e l'altro, ottenendo così una matrice di punti di calibrazione. I valori di pressione registrati in ogni punto della matrice vengono poi trasformati in coefficienti adimensionali, attraverso i quali è possibile costruire delle mappe di calibrazione. Esempi di mappe di calibrazione e del loro utilizzo possono essere trovate nella sezione 3.2.2. Questo tipo di calibrazione richiede però l'uso di un cinematismo in grado di muovere la sonda in due direzioni e l'acquisizione dei dati avviene in una molteplicità di punti. Ad esempio se si sceglie come range di variabilità per gli angoli ± 36 con intervallo di 2 gradi tra una posizione e l'altra, vuol dire che si è creata una griglia di 1369 elementi. Di conseguenza è necessario acquisire dati in 1369 punti che può essere molto dispendioso in termini di tempo.

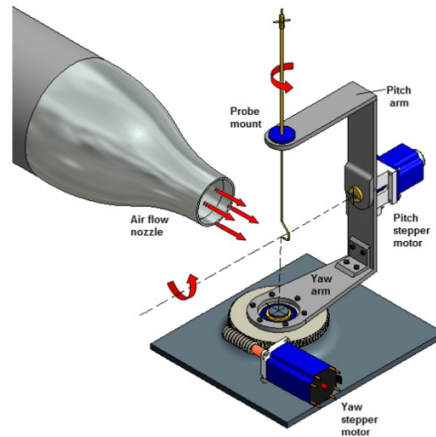


Figura 3.1: Esempio meccanismo per movimentazione sonda a 2 gradi di libertà [2].

Siccome l'obiettivo di questa tesi è quello di ridurre sia il tempo sia la difficoltà nella calibrazione di un tubo di Pitot a 5 fori si è studiata una soluzione che cercasse di migliorare questi due problemi. Prima di parlare nel dettaglio della soluzione trovata vengono introdotti i coefficienti adimensionali.

3.2.1 Coefficienti adimensionali

Siccome molto spesso le variazioni di pressione risultano essere piccole, è conveniente ragionare, piuttosto che con i veri valori di pressione, attraverso coefficienti adimensionali. Esistono varie forme adimensionalizzate in letteratura. In questo caso si è scelto di adottare l'adimensionalizzazione proposta da Krause e Dudzinsky [6], pionieri in questo tipo di misura. La figura 3.2 riporta la nomenclatura dei vari fori.

Si definisce la pressione media registrata dalle porte laterali \bar{P}

$$\bar{P} = (P_1 + P_2 + P_3 + P_4)/4. \quad (3.1)$$

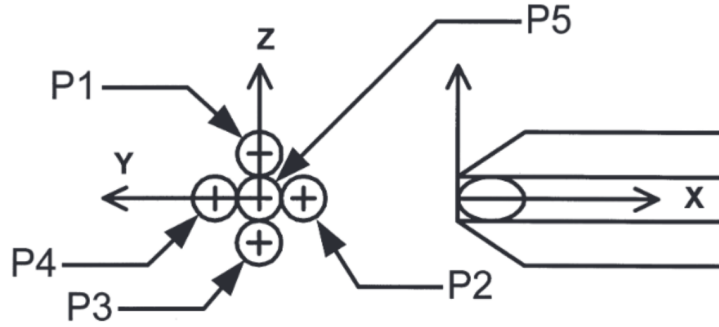


Figura 3.2: Nomenclatura dei fori [6].

Vengono quindi introdotti il coefficiente di beccheggio $C_{p\alpha}$, e quello di imbardata $C_{p\beta}$ per la determinazione della direzione del flusso:

$$C_{p\alpha} = \frac{P_1 - P_3}{P_5 - \bar{P}}, \quad (3.2)$$

$$C_{p\beta} = \frac{P_2 - P_4}{P_5 - \bar{P}}, \quad (3.3)$$

Vengono inoltre introdotti il coefficiente totale e statico per la determinazione della velocità:

$$C_{p_t} = \frac{P_5 - P_t}{P_5 - \bar{P}}, \quad (3.4)$$

$$C_{p_s} = \frac{\bar{P} - P_s}{P_5 - \bar{P}}, \quad (3.5)$$

Dove la pressione statica e totale vengono misurate da un tubo di Pitot alla Prandtl posizionato di fianco alla sonda. Tuttavia queste definizioni sono valide solo fino ad un certo valore di angolo di attacco, solitamente fissato intorno ai 30 gradi, come riporta [3]. Se l'angolo aumenta dopo questo valore il punto di ristagno anteriore si sposta dal foro centrale verso uno dei fori esterni causando la separazione del flusso nella parte anteriore della punta. Questo potrebbe portare a risultati singolari sulla definizione dei coefficienti di pressione.

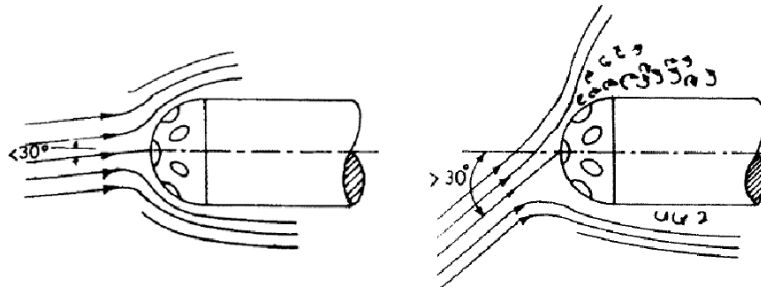


Figura 3.3: Separazione del flusso ad alti angoli d'attacco [3].

3.2.2 Mappe di calibrazione

Un tipico risultato delle mappe di calibrazione ottenibili è riportato nelle figure 3.4,3.5,3.6 e 3.7.

I grafici 3.4 e 3.5 rappresentano le superfici ottenute graficando l'andamento degli angoli in funzione dei coefficienti di beccheggio e imbardata.

I grafici 3.6 e 3.7 rappresentano invece le superfici ottenute dai coefficienti di pressione statica e totale al variare dei coefficienti di beccheggio e imbardata.

Se ora la sonda viene inserita in un flusso non noto, registrando le pressioni misurate e calcolando i coefficienti di beccheggio e imbardata, è possibile entrare nelle mappe 3.4 e 3.5 con i valori dei coefficienti e risalire agli angoli di provenienza della velocità.

Successivamente, è possibile entrare nei grafici 3.6 e 3.7 con i coefficienti di imbardata e beccheggio calcolati, risalendo così ai coefficienti di pressione statica e totale.

Usando poi le equazioni (3.6) e (3.7), si calcolano la pressione statica e totale, le quali possono essere usate per calcolare il modulo della velocità usando (1.3).

$$C_{p_s} = \frac{\bar{P} - P_s}{P_5 - \bar{P}} \rightarrow P_s = \bar{P} - C_{p_s}(P_5 - \bar{P}) \quad (3.6)$$

$$C_{p_t} = \frac{P_5 - P_t}{P_5 - \bar{P}} \rightarrow P_t = \bar{P} - C_{p_t}(P_5 - \bar{P}) \quad (3.7)$$

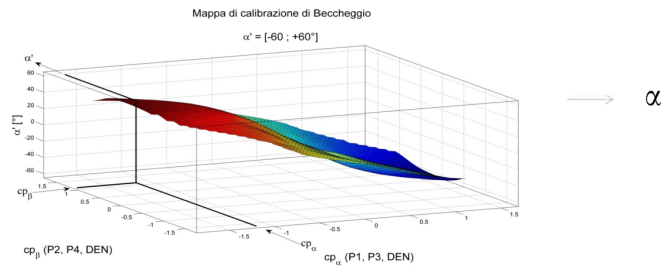


Figura 3.4: Mappa di calibrazione angolo di beccheggio.

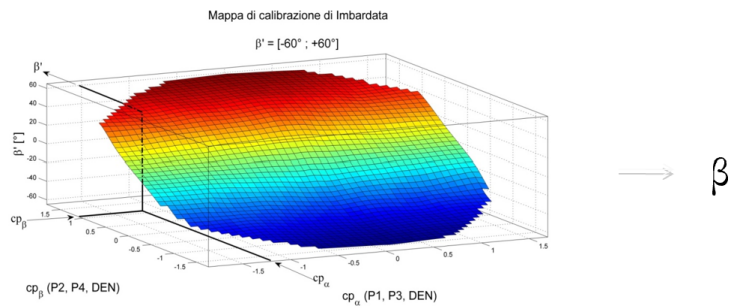


Figura 3.5: Mappa di calibrazione angolo di imbardata.

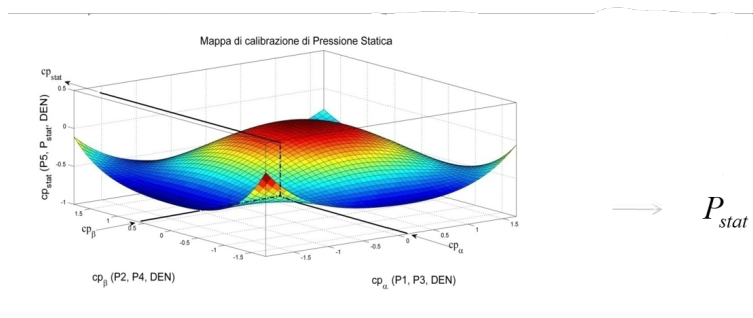


Figura 3.6: Mappa di calibrazione pressione statica.

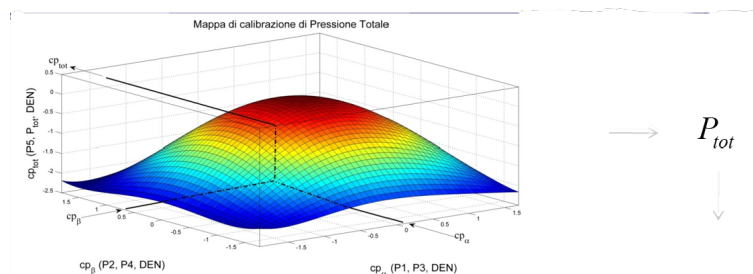


Figura 3.7: Mappa di calibrazione pressione totale.

Guardando infine la figura 3.8, è possibile notare come, una volta ottenuti angoli e modulo della velocità, sia possibile scomporla ottenendo le sue tre componenti usando (3.8), (3.9) e (3.10).

$$V_x = V \cos(\beta) \cos(\alpha), \quad (3.8)$$

$$V_r = V \cos(\beta) \sin(\alpha), \quad (3.9)$$

$$V_\theta = V \sin(\beta). \quad (3.10)$$

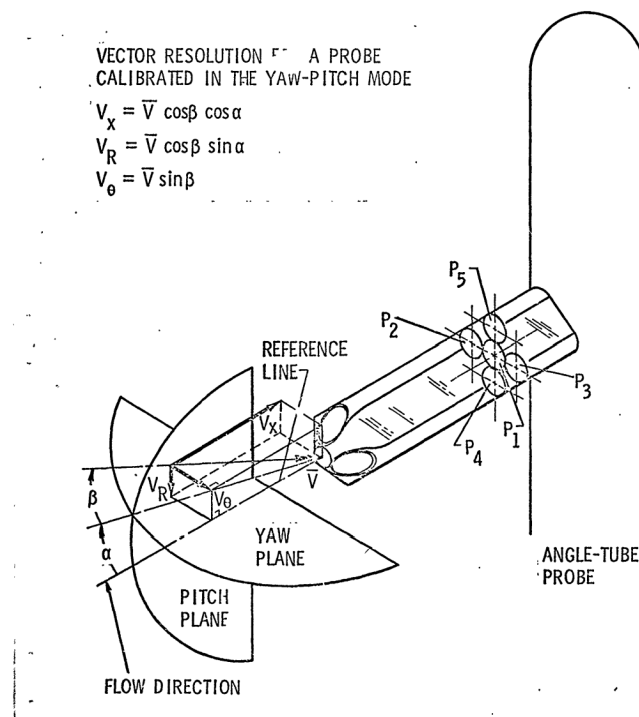


Figura 3.8: Scomposizione della velocità [6].

3.2.3 Effetto del numero di Reynolds e del numero di Mach

Gli effetti del numero di Reynolds, Re , sono stati ampiamente analizzati in letteratura. [7] spiega che gli effetti del numero di Reynolds sono certamente presenti, ma risultano essere trascurabili rispetto ad altri errori, come errori nella lettura. Inoltre, se la calibrazione viene eseguita nel range di numeri di Reynolds che ci si aspetta di incontrare durante l'uso della sonda, l'influenza del numero di Reynolds diminuisce ulteriormente. Per quanto riguarda il

numero di Mach, M , in letteratura sono presenti alcuni coefficienti correttivi, come ad esempio riporta [8]. Tuttavia è sempre rilevato che se il numero di Mach rimane sotto 0.3, come è nel caso di questa tesi, l'effetto del numero di Mach può ritenersi trascurabile.

3.3 Calibrazione semplificata

Siccome l'obiettivo di questa tesi è quello di capire se è possibile realizzare una calibrazione poco dispendiosa in termini di tempo e facilmente replicabile, si è cercato un modo per diminuire il tempo di acquisizione e allo stesso tempo di semplificare il cinematismo di movimentazione.

L'unico modo per ridurre il tempo di acquisizione è quello di ridurre il numero di punti sulla matrice di calibrazione. Si è quindi deciso di non calibrare sulla totalità dei punti, ma solo su una porzione di essi.

Questa idea di calibrazione si basa su un concetto fondamentale. Si afferma infatti che è possibile modellare gli effetti di accoppiamento imbardata-beccheggio attraverso una procedura di interpolazione. Dai grafici 3.4 e 3.5, si può notare come, alle estremità, le superfici non risultino essere dritte ma presentano delle ondulazioni, date appunto da fenomeni di accoppiamento, dei quali, solitamente, si tiene conto andando effettivamente a calibrare la sonda in quei punti. Per ottenere ciò sono state intraprese due strade.

Calibrazione su croce: in questo caso la griglia di acquisizione viene ridotta ad una croce. Cioè si effettuerà una calibrazione mantenendo $\beta = 0$ e facendo variare α , successivamente verrà mantenuto $\alpha = 0$ e verrà fatto variare β . La figura 3.9 mette in evidenza quali sono i punti sui quali verrà effettuata la calibrazione. Con riferimento all'esempio precedente, invece di un totale di 1369 punti, con questa procedura vengono presi in considerazione solo 72 punti. Tutti i restanti punti verranno ottenuti per interpolazione attraverso un data processing su Matlab.

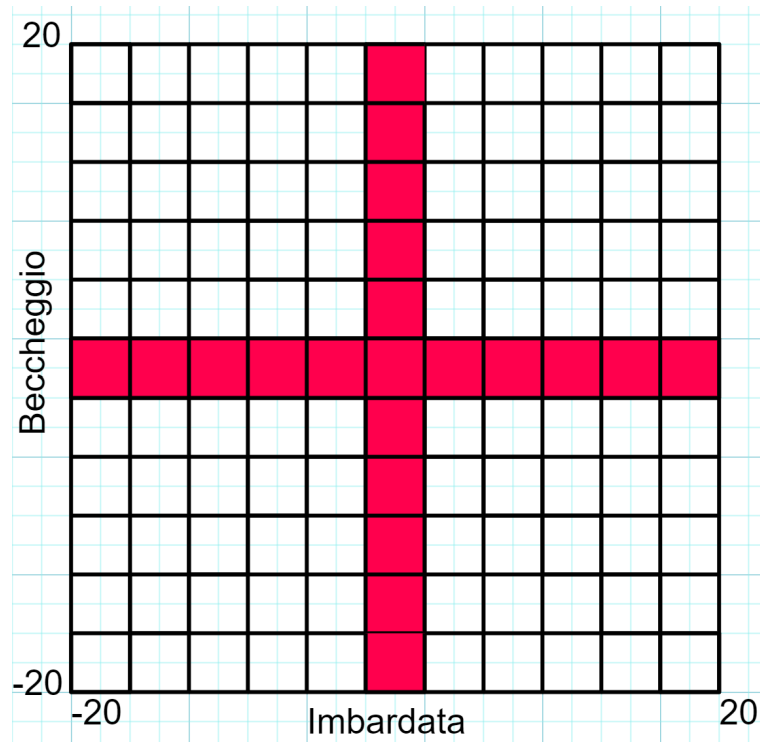


Figura 3.9: I quadrati rossi rappresentano i punti sui quali verrà calibrata la sonda secondo la calibrazione semplificata a croce, mentre la griglia rappresenta l'interezza dei punti sui quali andrebbe eseguita la calibrazione seguendo una procedura standard.

Calibrazione su stella: in questo caso, oltre alla calibrazione sulla croce, si utilizzeranno anche tutti i punti appartenenti alla diagonale principale e secondaria. La figura 3.10 ne riporta la schematizzazione grafica. Con riferimento all'esempio di prima, in questo caso, da 1369 punti si passa a 145.

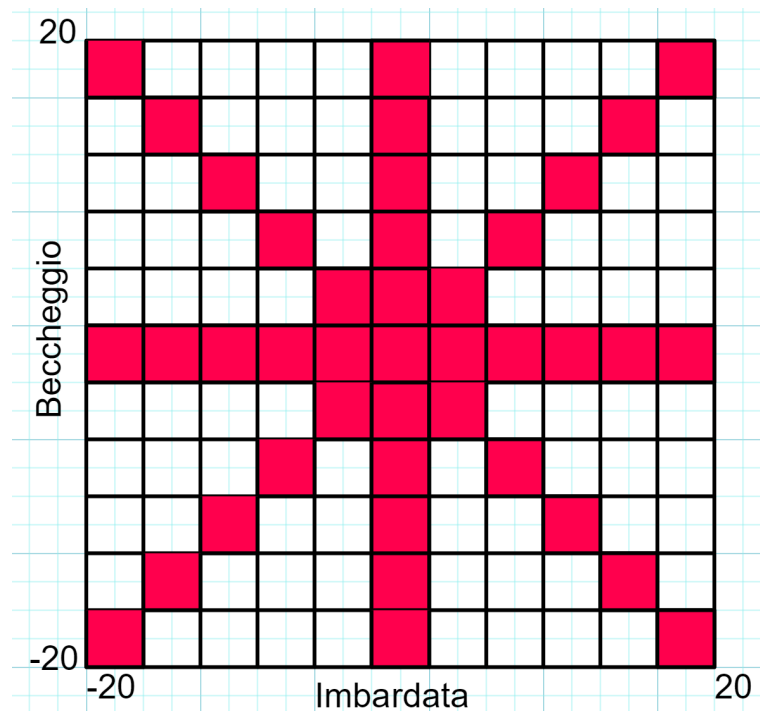


Figura 3.10: I punti rossi rappresentano i punti sui quali verrà calibrata la sonda secondo la calibrazione semplificata a stella, mentre la griglia rappresenta l'interezza dei punti sui quali andrebbe eseguita la calibrazione seguendo una procedura standard.

Per semplificare, invece, il meccanismo di movimentazione si è invece pensato ad un controllo ad 1 grado di libertà piuttosto che a 2. Tuttavia la movimentazione risulta differente per i due metodi presentati.

Movimentazione calibrazione a croce: il procedimento di calibrazione è mostrato attraverso il diagramma a blocchi in figura 3.11. Come si vede, la sonda viene prima fatta muovere lungo l'asse verticale, calibrandola mantenendo $\beta = 0$ e facendo variare α .

Successivamente la sonda viene ruotata di 90° e l'operazione viene ripetuta uguale. Nonostante la calibrazione esternamente avvenga due volte lungo stesso asse, nel sistema solidale alla sonda è in realtà stata effettuata una prima spazzata lungo l'asse verticale e una seconda spazzata lungo l'asse orizzontale. Questa idea si basa sull'ipotesi che il comportamento in imbardata e in beccheggio dei fori sia equivalente. Si presuppone quindi che calibrare le porte lungo l'asse di imbardata o di beccheggio sia equivalente in termini di risultati ottenuti.

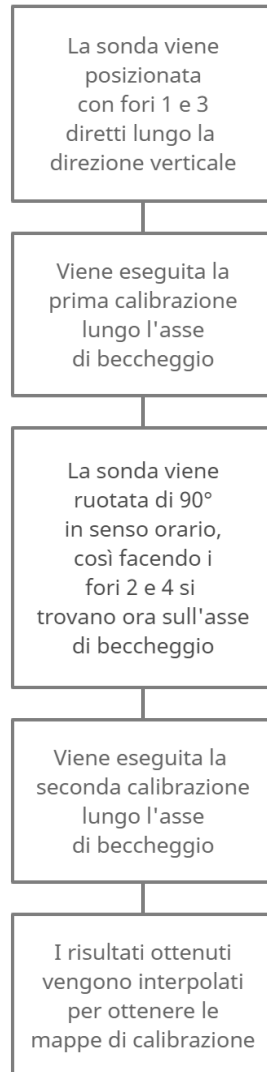


Figura 3.11: Diagramma a blocchi della calibrazione a croce.

Movimentazione calibrazione a stella: in questo caso, la croce viene ottenuta secondo lo stesso procedimento descritto sopra, mentre la sonda viene orientata manualmente nella direzione di imbardata per le posizioni appartenenti alle diagonali. L'idea di questo tipo di calibrazione è che, ottenendo informazioni anche dai punti estremi del dominio, durante la procedura di interpolazione si riesca a simulare meglio il vero comportamento dei grafici, riducendo così l'errore. Purtroppo, con questo tipo di calibrazione, si perde il controllo ad 1 grado di libertà e si ha la necessità di muovere la sonda anche nella direzione di imbardata. Tuttavia, dato che i punti di calibrazione sono notevolmente diminuiti, questo controllo può anche esse-

re eseguito manualmente.

Quello che si vuole portare a termine è quindi verificare se queste mappe di calibrazione, ottenute per interpolazione non sulla totalità dei punti, forniscano comunque buoni risultati. Tuttavia, prima di procedere con l'implementazione di questo metodo è necessario verificarne la fattibilità almeno teorica. Questo viene fatto attraverso un programma MATLAB.

3.3.1 Programma MATLAB

Per verificare la fattibilità del sistema descritto precedentemente è stato ideato un programma MATLAB ad hoc. Questo è stato possibile grazie a *Grant Ingram*, che ha messo a disposizione i risultati della sua calibrazione. In particolare il file si presenta così:

α	β	$C_{p\alpha}$	$C_{p\beta}$	C_{p_t}	C_{p_s}
-36.000000	-36.000000	5.078101	-6.026387	-3.168662	-0.128683
-36.000000	-34.000000	7.739617	-8.903047	-5.259692	0.143920
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
-34.000000	-36.000000	7.084451	-8.783816	-4.990590	-0.153467
-34.000000	-34.000000	6.520717	-7.743704	-4.375454	0.100821
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

Tabella 3.1: Campione del set di dati fornito da *Grant Ingram*.

La griglia di acquisizione è una matrice quadrata, dove sia l'angolo di beccheggio sia l'angolo di imbardata variano da -36° a $+36^\circ$ con passo di 2 gradi. In particolare l'angolo α rimane costante e viene fatto variare β , quando si è finito di far variare β si cambia α .

Tuttavia, guardando i valori dei coefficienti di pressione, si nota che qualche numero risulta estremamente sfasato, cosa che non era presente nelle mappe di calibrazione fornite sempre da *Grant Ingram*, come ad esempio:

α	β	$C_{p\alpha}$	$C_{p\beta}$	C_{p_t}	C_{p_s}
24.000000	34.000000	-37.055937	51.803729	-32.070658	-1.630821
24.000000	36.000000	158.994413	-225.743017	146.748603	10.838810

Tabella 3.2: Esempio di discontinuità nei dati forniti.

Si nota però che questo avviene solo nei punti molto estremi, proprio per questo si "tagliano" i vettori, linearizzando il problema, in modo da ottenere, anche se con una griglia più piccola, risultati più attendibili senza eventuali errori.

Una volta fatto ciò, si può passare all'interpolazione dei dati per ottenere le superfici di calibrazione. Verranno costruite e considerate solo le superfici relative ai coefficienti di pressione in beccheggio e imbardata, in quanto, purtroppo, i coefficienti di pressione statica e dinamica forniti presentano degli errori, infatti le superfici relative ad essi risultano essere del tutto discontinue. In tutti i grafici che verranno mostrati, i pallini rappresentano i veri valori dei vari coefficienti, ottenuti attraverso la procedura di calibrazione, mentre la superficie riportata risulta essere quella ottenuta per interpolazione.

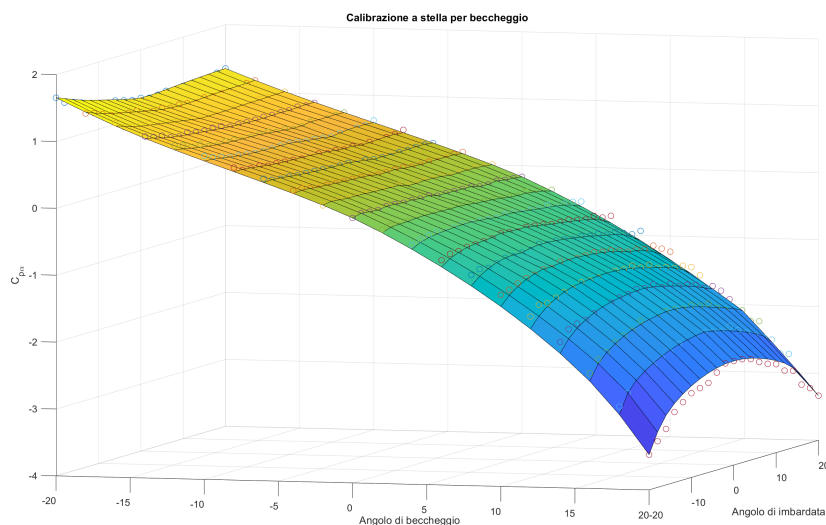


Figura 3.12: Calibrazione su stella beccheggio.

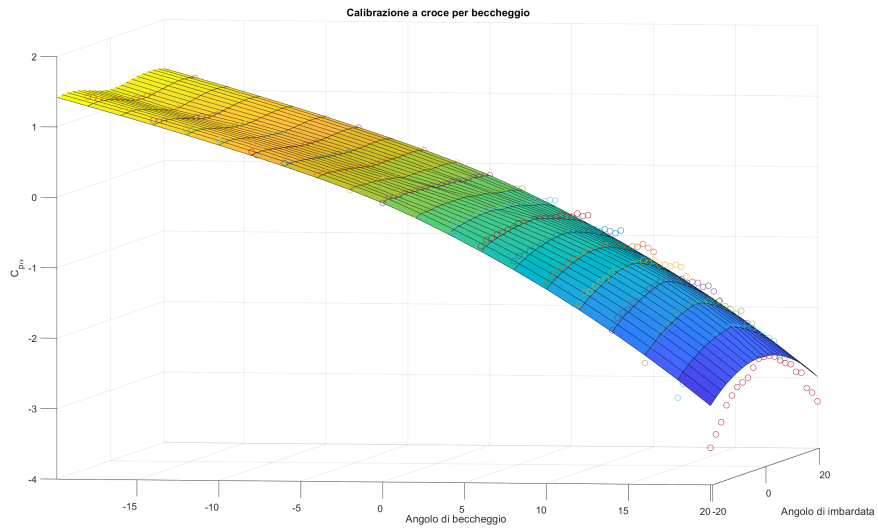


Figura 3.13: Calibrazione su croce beccheggio.

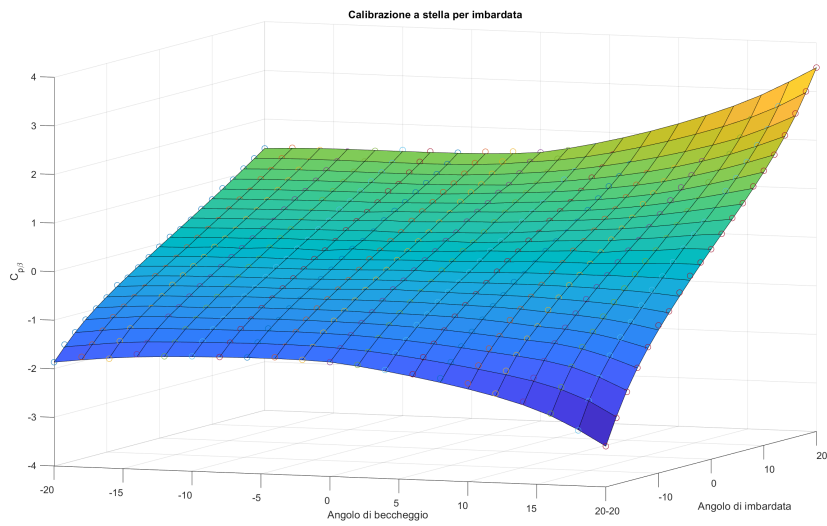


Figura 3.14: Calibrazione su stella imbardata.

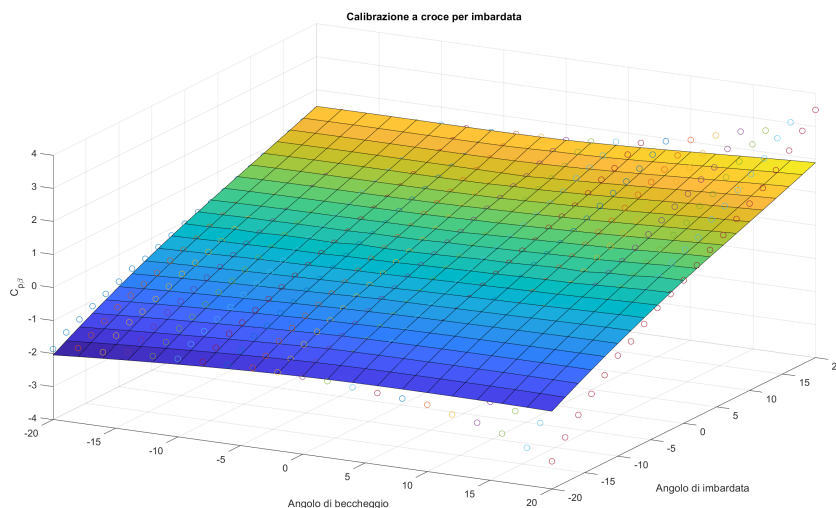


Figura 3.15: Calibrazione su croce imbardata.

Dai grafici ottenuti si può notare come, nonostante la calibrazione a croce sembri essere possibile, in quanto fornisce buoni risultati, essi siano sicuramente meno precisi rispetto alla calibrazione a stella. Come accennato precedentemente, infatti, calibrando anche sulle diagonali si riesce a tenere meglio in considerazione degli effetti accoppiati di imbardata-beccheggio, permettendo alle superfici ottenute di inseguire meglio il reale andamento dei coefficienti adimensionali.

Una volta ottenute le superfici interpolate, si calcola l'errore commesso nell'interpolazione secondo la formula (3.11). Quello che si vuole ottenere è l'errore relativo percentuale ad ogni punto tra superficie interpolante e superficie reale, in modo da poter visualizzare l'andamento della superficie d'errore.

$$E = |C_{p_{interp}} - C_{p_{reale}}| \quad (3.11)$$

Nella tabella 3.3 è riportato il valore medio dell'errore, sia in imbardata sia in beccheggio, per ciascun metodo di calibrazione.

ERRORE MEDIO INTERPOLAZIONE			
<i>BECCHEGGIO</i>		<i>IMBARDATA</i>	
Stella	Croce	Stella	Croce
0.102	0.192	0.091	0.608

Tabella 3.3: Errore medio commesso nelle interpolazioni.

Considerando i risultati ottenuti grazie a questo programma Matlab sembra, quindi, che una calibrazione semplificata sia possibile e fornisca buoni risultati, con un errore che rimane abbastanza basso. Tuttavia è importante notare che, per ora, la calibrazione lungo l'asse di imbardata è avvenuta grazie ad un apposito cinematismo, e non come descritto nella sezione 3.3, procedimento che potrebbe portare gli errori ad aumentare.

Capitolo 4

Setup sperimentale

4.1 Galleria del vento piana

La calibrazione della sonda è stata effettuata alla galleria del vento piana, o PAT (Plane Air tunnel), infrastruttura presente nel laboratorio di aerodinamica della Scuola di Ingegneria di Forlì. La calibrazione deve avvenire in un flusso che si può considerare laminare, nel quale la velocità risulti essere uniforme e nota, per questo la calibrazione è stata effettuata nella zona potenziale del getto. L'evoluzione teorica del getto piano è spiegata nel dettaglio nella appendice A. Una schematizzazione della PAT è riportata in figura 4.1. Come si può notare essa risulta essere composta da vari componenti, in particolare si trovano il motore, una pre-camera di calma, tubi in plastica, dispositivi per il trattamento del flusso e un convergente di uscita.

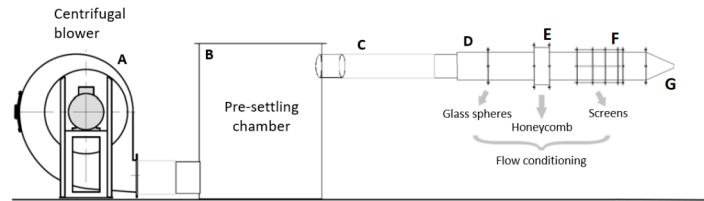


Figura 4.1: Vista laterale del PAT. Il flusso viene generato da un ventilatore centrifugo (A), trasferito prima ad una pre camera di calma (B) e poi alla sezione rettangolare con due tubi (C). Il flusso passa per le sfere di vetro (D) dove un po' della turbolenza viene annullata. Successivamente strutture a nido d'ape (E) aiutano a raddrizzare il flusso. Il flusso viene poi forzato attraverso una serie di schermi (F) che abbassano il livello di turbolenza. Infine il convergente (G) accelera il flusso prima della sezione di uscita.

Come può essere visto dalla figura 4.1 è presente un motore AC trifase che agisce come ventilatore centrifugo, fornendo l'aria di input alla galleria. I disturbi causati dal ventilatore vengono diminuiti usando una camera di pre-calma. L'aria in uscita dalla camera di pre-calma viene poi trasferita alla camera di calma attraverso due tubi simmetrici. La camera di calma include sferette di vetro, strutture a nido d'ape e tre schermi, tutti oggetti il quale scopo è quello di abbattere la turbolenza generata e rendere il flusso il più uniforme possibile. La parte finale del PAT è un ugello di uscita che ha il compito di accelerare il flusso e togliere ancora della turbolenza residua. Una foto del PAT presente nel laboratorio di aerodinamica è mostrata in figura 4.2. Maggiori informazioni riguardo a metodi costruttivi e informazioni sui singoli pezzi possono essere trovati in [9].

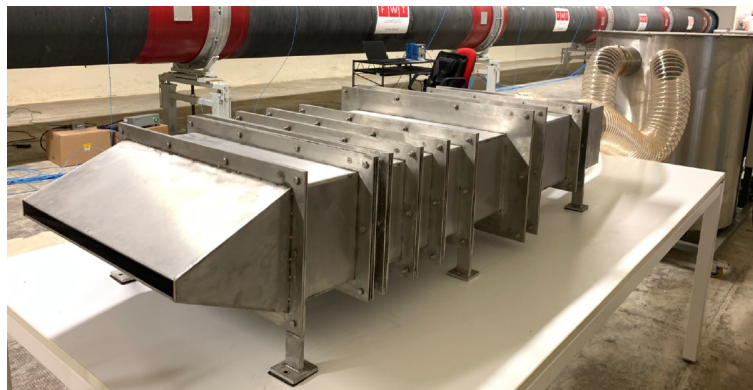


Figura 4.2: Vista del PAT dall'ugello di uscita.

4.2 Sistema di movimentazione

Per calibrare la sonda è necessario ruotarla attorno all'asse di beccheggio. Per ottenere ciò si è usato il sistema di movimentazione mostrato in figura 4.3. Come si può capire dalla figura, il sistema di movimentazione è azionato da un motore passo-passo che fornisce la rotazione ad un pezzo orizzontale sul quale viene fissato il tubo di Pitot a 5 fori.

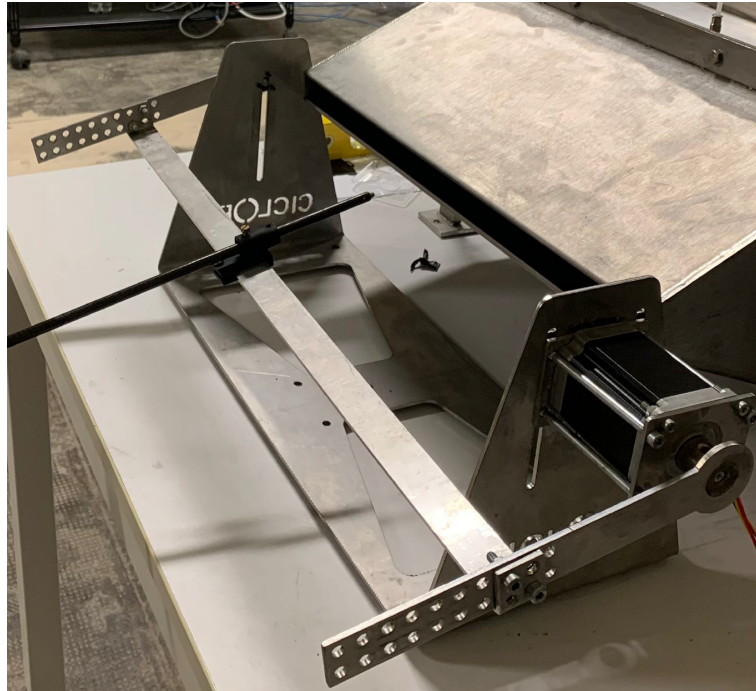


Figura 4.3: Sistema di movimentazione per la calibrazione del tubo di Pitot a 5 fori.

Il fissaggio avviene attraverso un supporto appositamente disegnato, mostrato in figura 4.4, il quale ha il compito di permettere alla sonda di essere allineata alla zona potenziale del getto piano e permettere alla punta della sonda di coincidere con il centro di rotazione del motore passo-passo, in modo da garantire la stessa posizione della punta durante tutta la procedura di calibrazione e che l'angolo effettivo del motore coincida con quello della sonda.

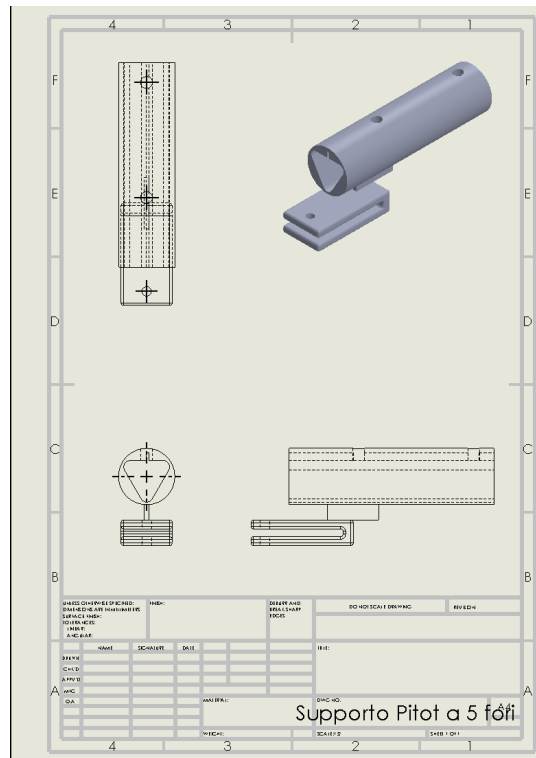


Figura 4.4: Supporto appositamente disegnato per il fissaggio del tubo di Pitot a 5 fori.

Per controllare il motore passo-passo dal computer tramite un apposito programma, esso è stato collegato sia all'alimentazione, sia ad un output digitale della scheda NI cDAQ-9189, dove l'input è invece un comando dal computer. Maggiori informazioni sul cablaggio e specifiche possono essere trovate in [10].



Figura 4.5: La figura a sinistra mostra la scheda NI cDAQ-9189, mentre la figura a destra mostra l'alimentazione del motore passo passo.

4.3 Elaborazione dei dati

Il processo che parte dall'acquisizione dei dati analogici fino ad averli in digitale è chiamato elaborazione dei dati. L'elaborazione dati ha un ruolo fondamentale in un esperimento. Per acquisire i dati voluti in maniera corretta si ha bisogno di un sistema composto da diverse strumentazioni, macchine e cavi. Una volta acquisiti i dati, essi vengono trasferiti al computer in modo da poterli poi processare. Come si è descritto nella sezione 1.3, i sensori sono il primo elemento della catena di acquisizione. I sensori sono quegli elementi che cambiano stato a contatto con la grandezza da misurare. Il secondo elemento è invece composto dai trasduttori, il loro compito è quello di trasformare il cambio di stato del sensore in un segnale, solitamente elettrico. Una volta ottenuto il segnale analogico della grandezza da misurare, esso viene convertito in digitale da un apposito sistema di acquisizione. Infine il segnale digitale deve essere poi trasferito al computer.

4.3.1 Sensori

Nel setup al PAT sono usati 2 tipi di sensori. Il primo tra questi è il tubo di Pitot alla Prandtl, mostrato in figura 4.6, che cambia la pressione a seconda della velocità del flusso, permettendo la misura sia di pressione statica sia di pressione dinamica.

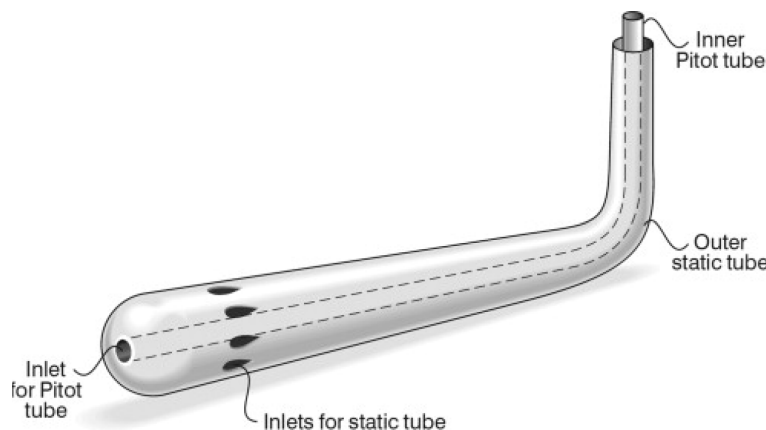


Figura 4.6: Tubo di Pitot alla Prandtl [5].

Con lo stesso principio di funzionamento del tubo di Pitot alla Prandtl è presente anche il tubo di Pitot a 5 fori, mostrato in figura 4.7 che viene usato per la misura delle 3 componenti della velocità.



Figura 4.7: Pitot a 5 fori.

Il setup finale per la calibrazione del tubo di Pitot a 5 fori è mostrato in figura 4.8. Come spiegato nella sezione 3.2, è necessario affiancare alla sonda a 5 fori il tubo di Pitot alla Prandtl, per essere in grado di realizzare anche le superfici dalle quali è possibile risalire al modulo della velocità. Tuttavia il tubo di Pitot alla Prandtl deve rimanere nella stessa posizione e direzione durante tutta la calibrazione. Per questo motivo esso non è solidale al sistema di movimentazione ma risulta montato su un supporto fisso più distante.

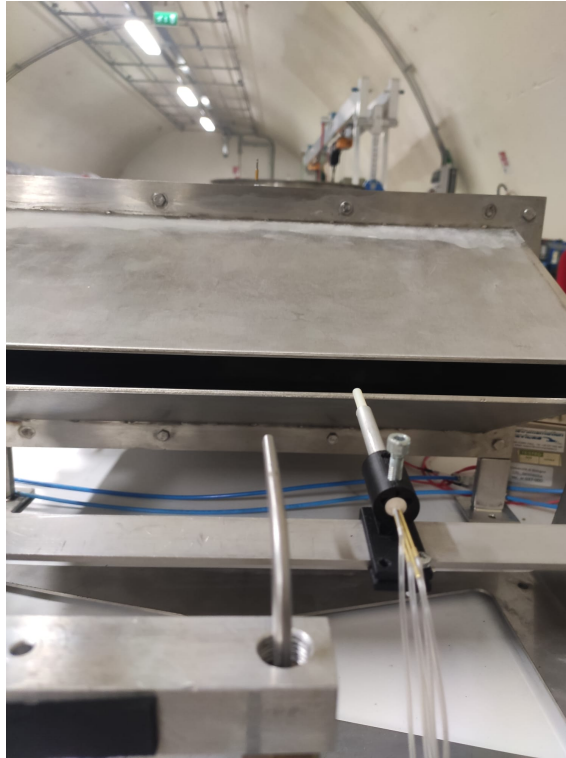


Figura 4.8: Setup finale.

4.3.2 Trasduttori

I trasduttori, convertendo il cambio di stato del sensore in un segnale, ci permettono di capire in maniera istantanea l'andamento della grandezza misurata, guardando il corrispondente segnale di output. Nel setup diversi tipi di trasduttori sono stati usati. In particolare sono stati utilizzati due trasduttori MKS identici, mostrati in figura 4.9 per la misura della pressione ambiente e della pressione dinamica. Per l'acquisizione delle pressioni in uscita dal tubo di Pitot a 5 fori invece, è stata usata la Scanivalve DSA3217, mostrata in figura 4.10 che permette l'acquisizione di più pressioni simultaneamente. Informazioni più dettagliate possono essere trovate in [10].



Figura 4.9: Trasduttori MKS.

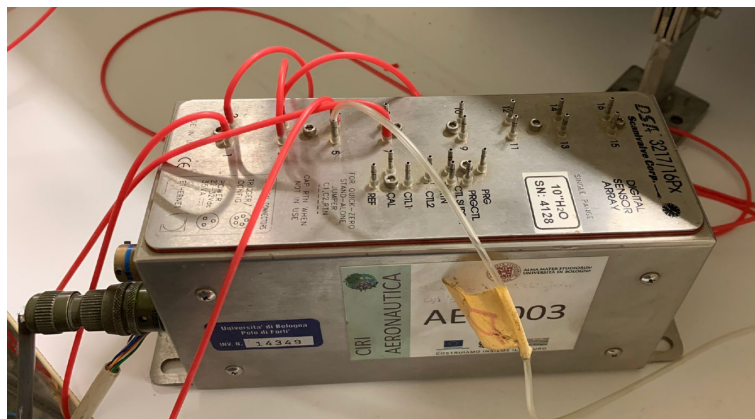


Figura 4.10: Scanivalve DSA3217.

4.3.3 Trasmissione dati

Per trasmettere i dati di output dei trasduttori al computer, in modo da visualizzarli, analizzarli e salvarli, viene usata una scheda A/D input/output, che comunica con il computer grazie ad una connessione ethernet. Maggiori informazioni possono essere trovate in [10].

4.4 Visualizzazione e controllo

Per quanto riguarda la visualizzazione dei dati, il controllo del motore passo-passo, la scelta della frequenza e del tempo di acquisizione, il trattamento

dei segnali in ingresso (amplificazione, offset, ecc...), viene tutto eseguito in automatico grazie ad un codice VI LabView. Il programma è interamente descritto in [10]. In figura 4.11 si riporta l'immagine del pannello principale di controllo.

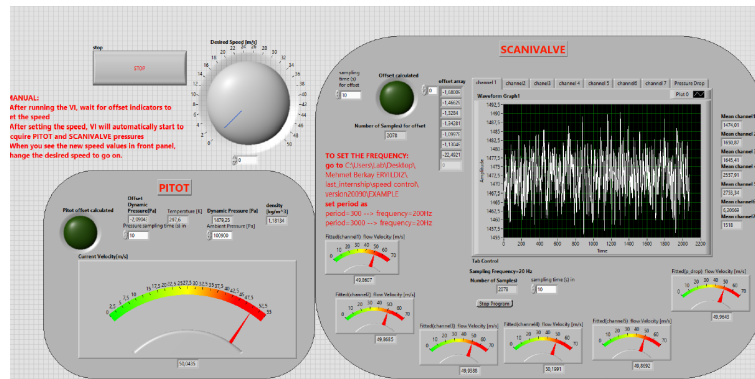


Figura 4.11: Pannello principale del codice LabView.

Capitolo 5

Risultati

Vengono di seguito riportati i risultati ottenuti dalla calibrazione del tubo di Pitot a 5 fori. L'obiettivo della presente tesi è quello di verificare se le mappe di calibrazione, ottenute attraverso una procedura di calibrazione semplificata, possano fornire dati accurati riguardanti la direzione del flusso e le 3 componenti della velocità. Come descritto in 3.2.3 l'influenza del numero di Mach, finché si rimane nel regime subsonico, può considerarsi trascurabile, mentre la dipendenza dal numero di Reynolds è minima, a patto che ci si mantenga lontani da numeri di Reynolds eccessivamente bassi, dove fenomeni viscosi sono prevalenti, generando così incertezze sulle misure. Vengono di seguito riportati quindi i grafici ottenuti dalla calibrazione, impostando la frequenza dell'inverter a 15Hz, quindi ad una velocità di circa 10 m/s.

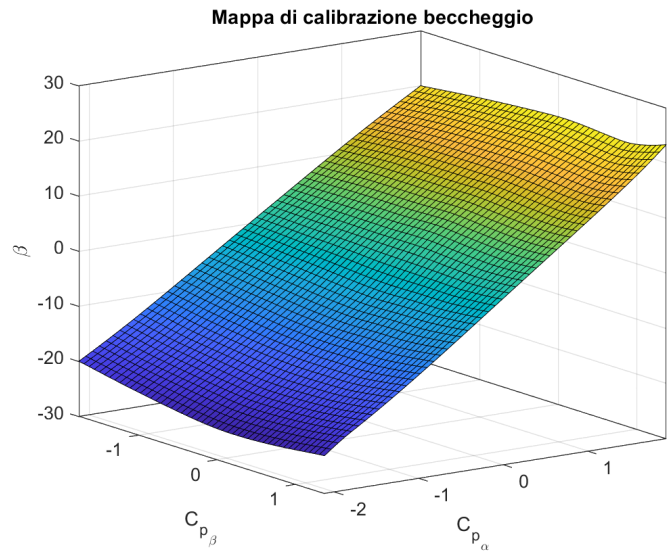


Figura 5.1: Mappa di calibrazione beccheggio.

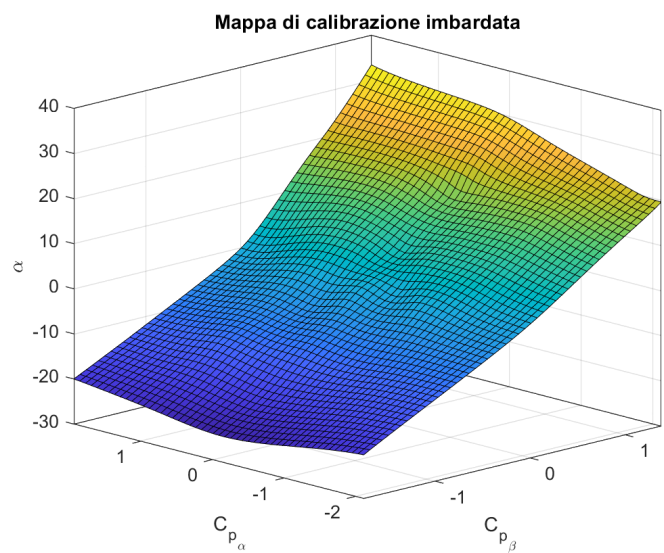


Figura 5.2: Mappa di calibrazione imbardata.

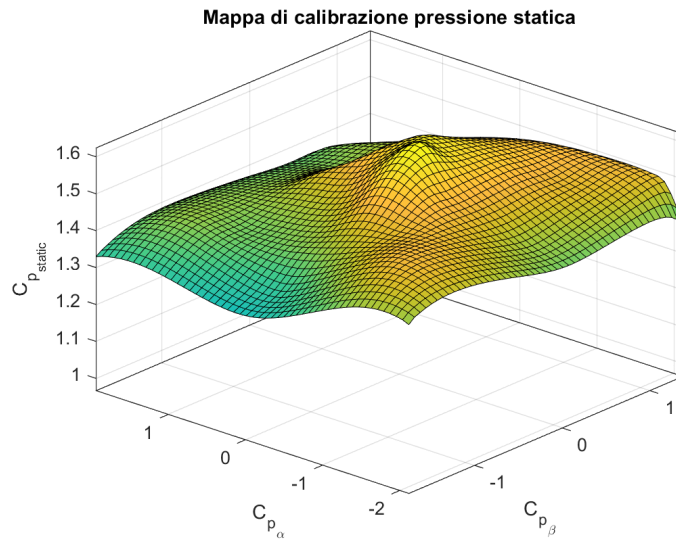


Figura 5.3: Mappa di calibrazione pressione statica.

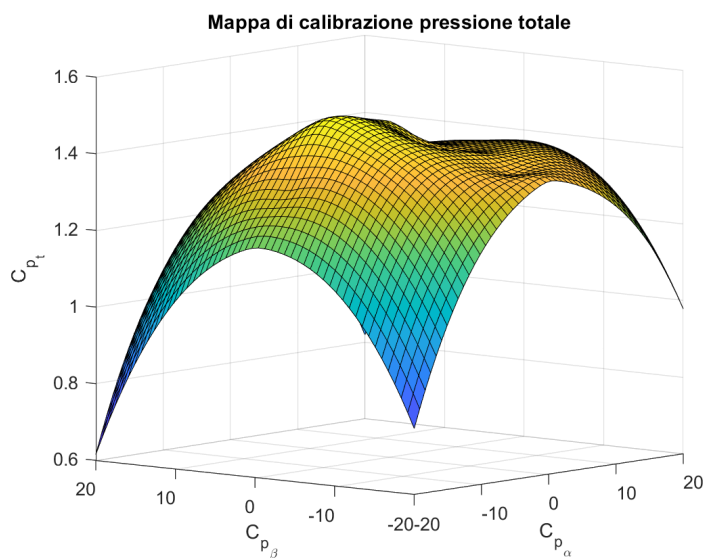


Figura 5.4: Mappa di calibrazione pressione totale.

Successivamente le mappe di calibrazione ottenute vengono testate con angoli di prova noti per verificare la loro affidabilità. I risultati sono mostrati nella tabella 5.1. Come si può notare si osserva una buona affidabilità nella stima degli angoli di provenienza del flusso. In particolare la calibrazione a stella risulta più consistente della calibrazione a croce.

REALI		STELLA		CROCE	
IMBARDATA	BECCHEGGIO	IMBARDATA	BECCHEGGIO	IMBARDATA	BECCHEGGIO
-17	13	-17.22	12.80	-20.33	11.80
-12	6	-10.30	5.84	-11.03	5.17
-7	17	-8.70	16.94	-10.34	16.46
-14	20	-12.66	19.83	-16.02	19.22
-4	17	-3.44	16.91	-3.61	16.80
-17	17	-15.02	16.84	-18.38	15.99
7	7	9.83	6.88	7.64	7.22
13	2	14.66	2.02	14.25	2.88
3	3	4.00	2.83	3.47	2.96
6	-4	8.19	-4.01	7.48	-3.23
20	-13	21.77	-12.69	24.17	-10.73
13	-4	11.92	-4.01	11.90	-2.98
3	-17	2.15	-16.94	2.25	-16.70
17	-16	16.72	-15.96	17.76	-14.14
9	-11	8.94	-10.99	8.52	-10.24
-3	-18	-4.68	-17.77	-5.17	-18.16
-17	-20	-16.75	-19.88	-22.23	-21.69
-10	-13	-11.34	-13.02	-12.11	-13.78
-20	-7	-19.00	-6.64	-19.80	-7.94
-12	-3	-10.56	-2.82	-10.38	-3.62

Tabella 5.1: Confronto risultati calibrazione a stella e a croce.

Discussioni e raccomandazioni

I risultati ottenuti sono abbastanza soddisfacenti, tuttavia, presentano errori che possono derivare da diverse fonti. Di seguito vengono investigate possibili cause di errori nelle mappe di calibrazione.

Sistema di movimentazione Il sistema di movimentazione risulta essere non perfetto. Infatti la posizione considerata come 0° di beccheggio, non risulta in realtà essere tale. Questo è dovuto principalmente dalla costruzione del sistema di movimento stesso. Infatti i bracci verticali, non risultano perfettamente allineati, di conseguenza il pezzo orizzontale montato tra i bracci non risulta essere perfettamente dritto.

Questo è dovuto principalmente al fatto che da un lato, il braccio verticale è montato insieme al motore passo-passo che, con il suo elevato peso, fornisce una base solida e rigida.

Dall'altro lato, invece, il braccio è fissato grazie ad un pezzo realizzato con tecniche di additive manufacturing, necessario per il funzionamento del sistema di movimentazione, che risulta essere una base molto meno solida rispetto al motore passo-passo.

Questo fatto porta quindi un disallineamento dei due bracci che porta ad un disallineamento di qualche grado del pezzo orizzontale.

È possibile verificare ciò anche dalle misure effettuate dal sensore. Infatti se la sonda viene posizionata a 0° sia di beccheggio sia di imbardata, e viene posizionata all'interno della zona potenziale, le pressioni sulle porte laterali dovrebbero essere uguali e di conseguenza i coefficienti adimensionali dovrebbero essere 0. Tuttavia questo non succede, infatti, il punto in cui la curva passa per lo 0 non coincide esattamente con l'angolo 0 del sistema di

movimentazione.

Questo offset risulta essere una fonte di errore che, a meno di drastici cambiamenti al sistema di movimentazione, non è possibile eliminare.

Proprio per questo potrebbe essere interessante ideare un algoritmo correttivo che tenga in considerazione questo fattore e corregga i vari grafici, in modo da studiare quanto effettivamente sia l'errore causato dal non perfetto allineamento del sistema di movimentazione.

Incertezza sulle posizioni Un'altra possibile fonte di errore è nella incertezza delle posizioni della sonda. Infatti, per quanto riguarda la posizione di imbardata il posizionamento è stato eseguito manualmente, procedimento che porta sicuramente a degli errori. Una procedura di posizionamento migliore potrebbe portare di certo a miglioramenti sulle mappe. Invece, la posizione di beccheggio, come già spiegato, è ottenuta tramite una movimentazione con un motore passo-passo che, però, presenta un passo realizzabile di 0.9° . Questo fa sì che quando viene fatto muovere il motore di 5 passi, in realtà non lo si sta muovendo di 5° , ma di 4.5° . Questa incertezza, oltretutto, si accumula, cioè a grandi angoli il distacco è maggiore. Tutto queste inaccurately sulla posizione della sonda sono fonti non indifferenti di errori.

Algoritmo di calibrazione Nella presente tesi l'elaborazione dei dati su Matlab è stata fatta nella maniera più standard possibile.

Infatti oltre a definire coefficienti adimensionali, partendo dalle misure effettuate, e interpolare i vari dati ottenuti per ottenere le curve finali, non è stata effettuata nessuna procedura correttiva o migliorativa all'interno dell'algoritmo.

Tuttavia, in letteratura, sono presenti molti algoritmi che tendono a migliorare la precisione dell'elaborazione dei dati.

Un'interessante alternativa è stata proposta da [11], che risulta essere l'ultima pubblicazione in ambito di algoritmi correttivi riguardo la calibrazione di Pitot a 5 fori. Come è possibile leggere il metodo presentato risulta essere

migliore dei primi algoritmi sviluppati, come ad esempio quello proposto da [12]. L'implementazione di questo metodo potrebbe permettere di ottenere mappe di calibrazione più accurate, riducendo così l'errore commesso durante l'interpolazione.

Costruzione sonda Per quanto riguarda il design della sonda esso risulta funzionante e di poco ingombro. Per il tipo di calibrazione presentata in questa tesi, la forma della testa non dovrebbe avere più di tanto effetto. Per questo, più che il design in sé e per sé, è necessario porre attenzione ad alcuni dettagli che sono fondamentali durante la procedura di calibrazione. In primo luogo la sonda deve essere alla giusta altezza per garantire che la punta cada esattamente all'interno della zona potenziale del getto piano. Successivamente va garantito che la punta della sonda cada nel centro di rotazione del motore passo-passo. Nel caso descritto nella presente tesi, questo è stato realizzato con dei supporti abbastanza lunghi per far sì che il posizionamento della sonda sia tale da soddisfare questo requisito. Un altro aspetto fondamentale risulta essere l'angolo di rollio. Infatti la sonda deve essere posizionata con 0° di rollio, cioè i fori devono essere tali da formare una croce dritta. Nel caso descritto in questa tesi, questo controllo è stato eseguito manualmente, per poi fissare la sonda attraverso l'uso di una vite. Tuttavia, una possibile soluzione, potrebbe essere quella di ideare un nuovo supporto con delle apposite alette che si incastrano in fori appositamente ideati sul corpo della sonda per garantire una maggiore precisione su questo requisito. Un altro aspetto fondamentale per questo tipo di calibrazione è l'angolo di imbardata che deve essere mantenuto a 0° anch'esso. Anche in questo caso il controllo è stato eseguito manualmente e poi il tutto fissato attraverso l'uso di una vite, ma un controllo più accurato potrebbe essere pensato per garantire una maggiore affidabilità.

Accoppiamento con il tubo di Pitot alla Prandtl Un altro aspetto da tenere in considerazione è l'accoppiamento con il tubo di Pitot alla Prandtl. Infatti, le misure di questo strumento sono fondamentali per quanto riguarda l'ot-

tenimento delle superfici di pressione totale e di pressione statica. Tuttavia, nel setup presentato, il sistema di movimentazione, a determinati angoli di beccheggio, era tale da posizionarsi davanti al tubo di Pitot stesso non facendo registrare la vera pressione totale al sensore. Questo errore interessa soprattutto la mappa di calibrazione per la pressione totale che, infatti, risulta essere la meno lineare. Di conseguenza, si osserverà una maggiore incertezza sul modulo della velocità che sulla provenienza del flusso.

Sviluppi futuri Possibili sviluppi futuri del seguente lavoro possono riguardare sia miglioramenti dell'attuale implementazione, sia nuovi metodi di calibrazione. Infatti, in tutta la procedura descritta, non è mai stato preso in considerazione l'angolo di rollio. Riuscire ad ottenere una mappa di calibrazione facendo muovere la sonda lungo l'asse di beccheggio e modificando l'angolo di rollio, che è legato all'angolo di imbardata tramite una relazione matematica, ad ogni step, potrebbe essere un'interessante soluzione, che potrebbe togliere definitivamente la necessità di un controllo lungo l'asse di imbardata. Altre possibilità risiedono nell'effettiva implementazione della sonda e delle mappe di calibrazione ottenute per la misurazione di campi di moto e misurazioni di velocità.

Capitolo 6

Conclusioni

Gli scopi principali della seguente tesi sono due.

Il primo riguarda la costruzione del tubo di Pitot a 5 fori. Si voleva infatti osservare se fosse possibile realizzare una sonda poco costosa e facilmente realizzabile e modificabile. Si è visto come sia sufficiente stampare solo la testa attraverso tecniche di additive manufacturing e successivamente unirla insieme ad altri pezzi, come descritto in precedenza, per ottenere una sonda ben costruita, solida e perfettamente funzionante.

Successivamente si è indagato sulla fattibilità di una calibrazione semplificata, in grado di permettere di abbassare notevolmente il numero di punti di calibrazione. Dal lavoro fatto è quindi emerso che la calibrazione semplificata di un tubo di Pitot a 5 fori costruito grazie a tecniche di additive manufacturing risulta essere possibile, infatti le mappe di calibrazione ottenute forniscono buoni risultati, con un errore che rimane sempre sotto il $\pm 3\%$. Per concludere, questo lavoro dimostra la possibilità di fabbricare tubi di Pitot a 5 fori perfettamente funzionanti attraverso soluzioni costruttive molto semplici e, inoltre, porta a termine una calibrazione con tempi notevolmente ridotti ma con ottimi risultati.

Appendice A

Getto piano

Un getto è un flusso in cui il fluido lascia l'uscita del corpo per finire nello spazio libero. Per esempio i gas di scarico che escono dalla marmitta di una autovettura creano un getto. Esistono due tipologie principali di getti. Una di queste è il getto assialsimmetrico (o getto rotondo). In questo caso la sezione d'uscita del corpo è rotonda creando diffusione in tutte le direzioni. L'altra tipologia di getto prende invece il nome di getto piano, nei quali la sezione di uscita è rettangolare, cioè presenta la grandezza caratteristica in una direzione molto maggiore rispetto all'altra. Entrambe le tipologie di getto presentano la componente dominante della velocità lungo la direzione del moto. Questo risulta in una diffusione nelle altre direzioni per effetto della turbolenza [13]. Il getto piano è stato studiato per la prima volta da Schlichting [13]. Dopo i suoi studi numerici, la caratterizzazione del getto piano è diventata una delle sfide della fluidodinamica. Il primo studio sperimentale fu eseguito da Forthman, che misurò e riportò i profili di velocità media del getto piano, si veda [13] per maggiori informazioni.

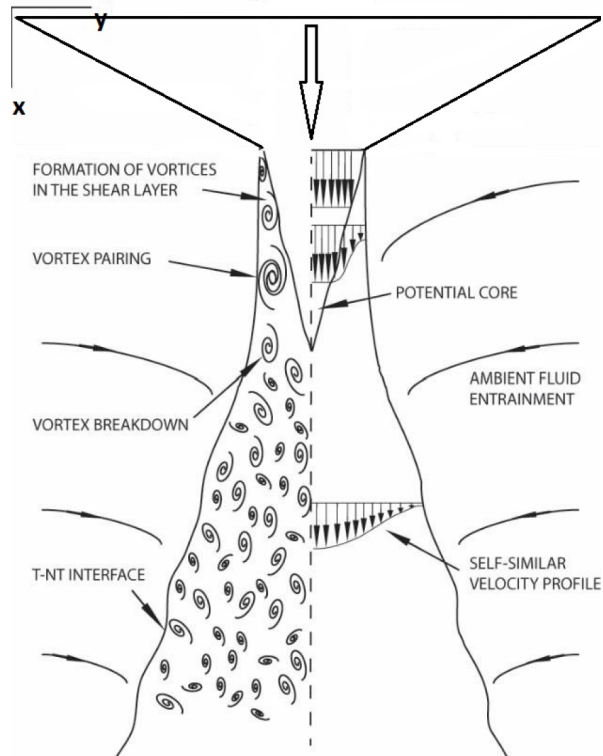


Figura A.1: Rappresentazione schematica di un getto piano [14]

La figura A.1 mostra lo schema base dell'andamento di un getto piano. L'aria esterna è da considerarsi stazionaria. Lo strato che separa l'aria in movimento dall'aria esterna stazionaria prende il nome di "Viscous super layer". In questa regione vengono a formarsi delle forze di taglio che risultano in un fenomeno che prende il nome di "Kelvin-Helmoltz instability". Questo fenomeno prevede che perturbazioni di piccola scala prendano energia cinetica dal flusso medio [15]. Come si può notare dalla figura, non appena il flusso esce dalla sezione di uscita, si crea quella che prende il nome di "zona potenziale", dove al suo interno la velocità rimane uniforme e costante; il flusso in questo caso prende il nome di flusso laminare. Subito dopo la zona potenziale, per via dell'instabilità descritta prima, si vengono a generare dei vortici, che vanno a formare quella zona che viene chiamata "shear layer". Questi vortici premono la zona potenziale costringendola a restringersi. Per questo la zona potenziale non può rimanere rettangolare, bensì si distende lungo la direzione del moto con una larghezza che tende a diminuire e perdendo la sua laminarità. I vortici, che si vengono a creare alla sezione di uscita, vengono trascinati lungo la direzione del moto

insieme alla zona potenziale, aumentando la propria dimensione e restringendo sempre di più la zona potenziale. Questi vortici crescono a tal punto da arrivare ad interrompere la zona potenziale, la quale collassa. In questo caso si dice che il flusso è diventato completamente turbolento. Un getto piano turbolento può essere studiato con metodi statistici per ottenere risultati mediati sul tempo. Un altro effetto delle forze di taglio è un fenomeno che prende il nome di "entrainment". Questo fenomeno è il responsabile dell'entrata di flusso esterno all'interno del getto piano. Per via di questo fenomeno la larghezza della regione interessata dal getto aumenta, mentre la velocità media diminuisce. Ad una certa distanza dalla zona potenziale lungo la direzione del moto, il profilo di velocità assume una forma "self-similar", ovvero il flusso non subisce più di tante variazioni. In questo caso il flusso si può definire completamente sviluppato

Elenco delle figure

1.1	Manometro ad U [1].	6
1.2	Trasduttore elettrico.	7
1.3	Rappresentazione del flusso attorno ad un profilo non simmetrico. Il pallino rappresenta il punto di ristagno, la zona rossa è la zona di depressione mentre la zona blu è la zona di sovrappressione [2].	8
1.4	Tubo di Pitot [1].	9
1.5	Sensore per pressione statica [1].	10
1.6	Tubo di Pitot alla Prandtl [1].	11
1.7	Tubo di Pitot a 3 fori.	12
1.8	Da sinistra verso destra si possono vedere tubi di Pitot a 5 fori sferici, ad "L" , a cobra e ad alta frequenza di acquisizione [1].	14
2.1	Macchina usata per pulire i tubi di Pitot a 5 fori tramite un getto d'acqua in pressione.	17
2.2	Pitot a 5 fori prototipo A.	18
2.3	Vista frontale.	18
2.4	Vista in sezione.	19
2.5	Pitot a 5 fori prototipo C.	20
2.6	Vista in sezione.	20
2.7	In ordine, da sinistra a destra, dal prototipo C a quello A. . . .	20
2.8	Rinforzo dei microtubi in alluminio per limitare effetti di instabilità di carico di punta.	22
2.9	Design completo della sonda con il prototipo B della testa. . .	22
2.10	Altra vista della sonda completata.	23

3.1	Esempio meccanismo per movimentazione sonda a 2 gradi di libertà [2].	26
3.2	Nomenclatura dei fori [6].	27
3.3	Separazione del flusso ad alti angoli d'attacco [3].	28
3.4	Mappa di calibrazione angolo di beccheggio.	29
3.5	Mappa di calibrazione angolo di imbardata.	29
3.6	Mappa di calibrazione pressione statica.	29
3.7	Mappa di calibrazione pressione totale.	29
3.8	Scomposizione della velocità [6].	30
3.9	size=small	32
3.10	size=small	33
3.11	Diagramma a blocchi della calibrazione a croce.	34
3.12	Calibrazione su stella beccheggio.	36
3.13	Calibrazione su croce beccheggio.	37
3.14	Calibrazione su stella imbardata.	37
3.15	Calibrazione su croce imbardata.	38
4.1	Vista laterale del PAT. Il flusso viene generato da un ventilatore centrifugo (A), trasferito prima ad una pre camera di calma (B) e poi alla sezione rettangolare con due tubi (C). Il flusso passa per le sfere di vetro (D) dove un po' della turbolenza viene annullata. Successivamente strutture a nido d'ape (E) aiutano a raddrizzare il flusso. Il flusso viene poi forzato attraverso una serie di schermi (F) che abbassano il livello di turbolenza. Infine il convergente (G) accelera il flusso prima della sezione di uscita.	41
4.2	Vista del PAT dall'ugello di uscita.	41
4.3	Sistema di movimentazione per la calibrazione del tubo di Pitot a 5 fori.	42
4.4	Supporto appositamente disegnato per il fissaggio del tubo di Pitot a 5 fori.	43
4.5	La figura a sinistra mostra la scheda NI cDAQ-9189, mentre la figura a destra mostra l'alimentazione del motore passo passo.	43

4.6	Tubo di Pitot alla Prandtl [5].	44
4.7	Pitot a 5 fori.	45
4.8	Setup finale.	46
4.9	Trasduttori MKS.	47
4.10	Scanivalve DSA3217.	47
4.11	Pannello principale del codice LabView.	48
5.1	Mappa di calibrazione beccheggio.	50
5.2	Mappa di calibrazione imbardata.	50
5.3	Mappa di calibrazione pressione statica.	51
5.4	Mappa di calibrazione pressione totale.	51
A.1	Rappresentazione schematica di un getto piano [14]	59

Bibliografia

- [1] E. Rathakrishnan, *Instrumentation, Measurements, and Experiments in Fluids*. Taylor & Francis, 2007.
- [2] P. Ruchala, K. Stryczniewicz, P. Malachowski, L. Santos, and D. Back, "Use and calibration of 5-hole pressure probes to measurement of airflow velocity," *Journal of KONES*, vol. 25, pp. 319–327, 09 2018.
- [3] C. V. Babu, M. Govardhan, and N. Sitaram, "A method of calibration of a seven-hole pressure probe for measuring highly three-dimensional flows," *Measurement Science and Technology*, vol. 9, pp. 468–476, mar 1998.
- [4] E. Ower, "Pressure-probe methods for determining wind speed and direction. d. w. bryer and r. c. pankhurst. hmsO, london, 1971. 126 pp. illustrated. £3.50.," *The Aeronautical Journal (1968)*, vol. 75, 1971.
- [5] S. Tavoularis, *Measurement in Fluid Mechanics*. Cambridge University Press, 2005.
- [6] T. J. Dudzinski and L. N. Krause, "Flow-direction measurement with fixed-position probes in subsonic flow over a range of reynolds numbers.," 1969.
- [7] G. G. Zillac, "Modelling, calibration, and error analysis of seven-hole pressure probes," *Experiments in Fluids*, vol. 14, pp. 104–120, Dec. 1993.
- [8] A. Gerner, C. L. Maurer, and R. W. Gallington, "Non-nulling seven-hole probes for high angle flow measurement," *Experiments in Fluids*, vol. 2, pp. 95–103, 1984.

- [9] A. Alvisi, *Progettazione di un sistema di calibrazione ex-situ per anemometri a filo caldo*. PhD thesis.
- [10] M. B. Eryildiz, "Development and automatization of a planar jet wind tunnel for the x-wire calibration."
- [11] A. R. Paul, R. R. Upadhyay, and A. Jain, "A novel calibration algorithm for five-hole pressure probe," *International Journal of Engineering, Science and Technology*, vol. 3, no. 2, 2011.
- [12] A. Pisasale and N. Ahmed, "A novel method for extending the calibration range of five-hole probe for highly three-dimensional flows," *Flow Measurement and Instrumentation*, vol. 13, no. 1, pp. 23–30, 2002.
- [13] N. WU, Y. SAKAI, K. NAGATA, H. SUZUKI, O. TERASHIMA, and T. HAYASE, "Analysis of flow characteristics of turbulent plane jets based on velocity and scalar fields using dns," *Journal of Fluid Science and Technology*, vol. 8, no. 3, pp. 247–261, 2013.
- [14] S. H. Hassan, T. Guo, and P. P. Vlachos, "Flow field evolution and entrainment in a free surface plunging jet," *Phys. Rev. Fluids*, vol. 4, p. 104603, Oct 2019.
- [15] L. Gramer, L. Gramer@noaa, and Gov, "Kelvin-helmholtz instabilities," 05 2007.