

POLITECNICO DI MILANO

Facoltà di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea in
Ingegneria Aeronautica



Galleria del vento a pareti autoadattative, indagine del campo di moto di
un'ala a delta

Relatore: Prof. Sergio DE PONTE

Tesi di Laurea Magistrale di:
Andrea MALOBERTI Matr. 787577

Ringraziamenti

Ringrazio sentitamente il Prof. Sergio De Ponte che con infinita pazienza è riuscito ad accompagnarmi durante questo lavoro di tesi, rendendosi disponibile a qualsiasi ora del giorno senza farmi mai mancare la sua assistenza. Si ringrazia il Prof. Marco Belan per la disponibilità mostrata e per gli utili consigli elargiti durante la fase sperimentale del progetto e tutti i compagni di laboratorio che hanno reso il lavoro molto più piacevole. Ringrazio anche Edoardo, Alessandro ed Elisa fedeli compagni nel percorso all'interno del Politecnico.

Ringrazio inoltre i miei genitori Sandro e Antonella che durante il mio percorso formativo non mi hanno mai fatto mancare il loro sostegno. Ringrazio gli amici Mattia, Federica e Ugo che mi hanno permesso di continuare il mio percorso di studi anche durante il periodo lavorativo. Ringrazio sentitamente anche gli amici Giuseppe, Elia, Ramona, Valentina, Michele, Alberto, Matteo M. e Michela che hanno avuto il coraggio di sopportarmi, anche quando la strada, mettendosi in salita, mi ha reso insopportabile; ringrazio tutti gli altri amici Emanuele, Michele S., Luca, Gianluca, Lorenzo, Filippo, Giuliano, Andrea P., Riccardo, Andrea Z. e Matteo A. che con la loro esuberanza hanno contribuito ad alleggerire tutto il periodo degli esami. Ringrazio anche tutti gli altri amici e compagni di squadra che nel corso degli anni mi hanno insegnato che il gruppo vince sempre sull'individuo. Ringrazio tutti i miei allenatori che con i loro consigli mi hanno insegnato il rispetto e la disciplina, senza i quali non sarei riuscito ad ottenere nulla. Ringrazio Stefania, Rossana, Patrizia, Daniele, Lisa, Valentina M., Samuele, Rosa, Renato, Carlo, Iside, Davide ed Erica che hanno fortemente contribuito alla mia formazione ispirandomi e cercando sempre di indirizzarmi sulla retta via.

Infine un ringraziamento speciale va' al piccolo Gioele il quale mi ha insegnato che la vita mostra sempre il suo lato migliore, basta vederla con gli occhi di un bambino.

Sommario

Il seguente documento tratterà argomenti legati alle misure in galleria del vento. Ovvero si potrà notare com'è possibile ottenere risultati di natura tridimensionale partendo da misure di tipo bidimensionale, trattando il campo di velocità indotte dai vortici portanti di un'ala a delta. Quindi si parlerà di come è possibile modellare le pareti, sfruttando la teoria a potenziale, per ottenere risultati soddisfacenti senza dover effettuare correzioni analitiche a posteriori, le quali sarebbero necessarie in caso di pareti fisse.

Indice

1	L'impianto di prova e il sistema di misura	5
1.1	Il restauro	6
1.1.1	Il supporto del modello	7
1.1.2	Il posizionamento delle pareti	8
1.1.3	La selezione dei motori	8
1.1.4	La selezione delle prese di pressione	8
1.2	Il sistema di misura	9
1.2.1	Il rilevamento della posizione	9
1.2.2	Le misure di pressione	9
2	La modellizzazione	11
2.1	La discretizzazione	11
2.2	Il metodo a potenziale e lo spostamento delle pareti	11
2.3	Verifica del metodo, utilizzo di un caso noto	14
3	Il procedimento d'indagine e l'esecuzione della prova	19
3.1	L'esecuzione della prova	19
3.2	Commenti sul criterio di convergenza	20
3.3	I Dati ottenuti	21
3.3.1	Commenti sulle prese mancanti e in prossimità degli estremi della camera di prova	26
3.4	I risultati	26
3.5	Le conclusioni e i possibili miglioramenti	29
A	I codici utilizzati	31
A.1	I Codici accessori	31
A.2	Calcolo linee di corrente del cilindro: Streamlinecylinder	31
A.3	Il calcolo delle configurazioni delle pareti	32

Elenco delle figure

1	Campo di moto sul dorso di un'ala a delta	3
2	Visualizzazione dell'esplosione del vortice portante (Immagine tratta dal sito della Defence Science and Technology Organisation - Melbourne)	4
1.1	Vista della galleria del vento utilizzata per la prova, strumentazione compresa	6
1.2	Supporto modello : (A) Collegamento supporto parete lato dorso , (B) Vista del supporto all'interno della camera di prova, (C) Collegamento supporto parete lato ventre	7
1.3	Scanivalve utilizzata per la misura delle pressioni	9
2.1	Grafico andamento delle intensità delle sorgenti	16
2.2	Andamento velocità indotta	16
2.3	Configurazione iniziale e finale della camera simulata	17
2.4	Andamento linee di corrente attorno al cilindro simulato	17
3.1	Pareti deformate dopo la prima iterazione con modello a 15° , il sistema di riferimento è un sistema ortogonale di assi con ascissa corrispondente alla lunghezza della camera di prova con origine sull'uscita dell'imbocco, l' ordinata corrisponde all'apertura e ha origine in mezzeria	20
3.2	Configurazione delle pareti ad ogni iterazione per modello ad incidenza di 15°	27
3.3	Configurazione delle pareti ad ogni iterazione per modello ad incidenza di 25°	28

Introduzione

Prima di approfondire il lavoro svolto in laboratorio e discutere i risultati ottenuti, di seguito verranno spiegati alcuni concetti di base indispensabili per poter capire a pieno le informazioni che seguiranno.

Come ogni esperimento o prova sperimentale che dir si voglia, anche in questo caso sorgono una serie di problemi legati al fatto che i modelli e le condizioni al contorno implementati non corrispondono mai alla realtà, di fatto si opera sempre con delle approssimazioni, inoltre anche gli strumenti di misura utilizzati produrranno valori affetti da errori. Detto ciò nel caso specifico delle gallerie del vento i tipi di errori commessi possono essere di natura diversa : disuniformità introdotte da convergente e ventola, effetti dovuti a strato limite generato dalle pareti della camera di prova, perturbazioni generate dal supporto del modello, effetti di bloccaggio introdotti dai corpi in camera di prova e tutta una serie di imprecisioni sulle condizioni al contorno dovute al fatto che si stà provando modelli, che generalmente operano in aria libera, in un ambiente chiuso.

Nel caso in esame si è deciso di considerare principalmente gli errori dovuti alla presenza di pareti che confinano il flusso e di trascurare tutto ciò che riguarda l'immisione del flusso e il posizionamento del modello, poichè in prima approssimazione si sono ritenuti trascurabili. Ciò che si considererà nel seguito saranno tutte quelle perturbazioni dovute alla presenza delle pareti :

- bloccaggio solido: in genere il rapporto tra la superficie frontale di un corpo e quella dell'area di test è zero poiche in aria libera la prima è trascurabile rispetto all'ambiente (considerato di sezione infinita), questo in galleria del vento non è vero poiche la sezione della camera di prova potrebbe essere anche di pochi ordini di grandezza superiore, rendendo di fatto il rapporto sopracitato un , seppur piccolo, valore finito maggiore di zero. Se tale valore è al difuori del range 0.01-0.10 si vedranno gli sforzi di superficie sul modello, maggiorati rispetto ad una prova in aria libera; da notare che la scelta di un getto aperto come

camera di prova non risolve il problema, anzi in questo caso gli sforzi sulla superficie del corpo risultano minori rispetto alla condizione di aria libera.

- bloccaggio di scia: un corpo in camera di prova possiede una scia di dimensioni finite, le quali dipendono dalla forma dello stesso e si comporta, un'aumento della resistenza;
- galleggiamento orizzontale: in buona parte delle gallerie del vento con camera di prova chiusa, si ha, in assenza del modello, una variazione di pressione statica non nulla. Tale fenomeno provoca, sul corpo, qualcosa di simile alle forze idrostatiche;
- variazione induzione normale: in questo caso ci si riferisce alla componente normale alla velocità asintotica del flusso indotto dovuta alla distanza finita tra modello e pareti. Ciò causa un aumento di portanza e una riduzione della resistenza indotta;
- distorsione induzione in apertura: in questo caso si ha una variazione dell'angolo d'attacco locale, la quale causa una riduzione del range di angoli d'incidenza geometrici ai quali non si verifica lo stallo;
- curvatura delle linee di corrente: la presenza di pareti solide causa una variazione della forma delle linee di corrente, tale effetto è proprio quello che si vorrà ridurre maggiormente muovendo le pareti. Inoltre ciò comporta incrementi di portanza, di angolo d'incidenza e di coefficiente di momento. Parametri che influenzano maggiormente la velocità indotta, la quale è proprio uno dei dati che si andrà ad indagare.

Per maggiori approfondimenti riguardo a quanto appena scritto si faccia riferimento a [4]

A questo punto è bene avere gli strumenti anche per meglio comprendere un'altro aspetto fondamentale del lavoro che seguirà. Di fatto si è deciso di operare con ali a delta e di indagare, tramite prove bidimensionali, gli aspetti legati alla velocità indotta che logicamente spingerebbero ad un'analisi tridimensionale.

Come già noto le ali a delta sono sfruttate in campo supersonico grazie alle loro proprietà proprio in questi regimi. Mentre in regime incomprimibile presentano numerosi problemi. Infatti questa particolare forma della pianta alare si comporta molto diverso rispetto a quella delle ali intese in senso classico. Ovviamente la generazione della portanza, come per qualsiasi tipo di ala, dipende dalla differenza di pressione tra dorso e ventre. Ciò che

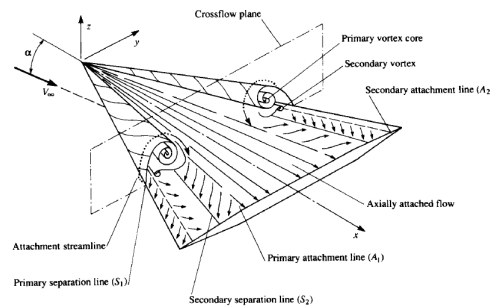


Figura 1: Campo di moto sul dorso di un'ala a delta

rende particolari queste ali è il fatto che, sul dorso, si instaurano dei moti vorticosi che incrementano la depressione e quindi si ha di conseguenza un incremento di portanza. Più precisamente si ha la generazione di vortici dovuti, esprimendosi in modo semplicistico, al tentativo del flusso sul ventre di passare, attraverso al bordo d'attacco, sul dorso. Tale meccanismo è in realtà un fenomeno molto complesso che come si può intuire, dipenderà del raggio del bordo d'attacco, dal numero di Mach, dal numero di Reynolds e dall'incidenza. Le cose risultano però meno complicate se si parla di bordi affilati. Inoltre per poter effettuare eventuali confronti tra varie prove ed esperimenti, questi ultimi sono preferibili soprattutto se l'intenzione è quella di utilizzare metodi per flussi inviscidi, come nel caso in esame, poiché è possibile modellare effetti viscosi esplicitamente. Inoltre in questi casi la posizione della prima separazione risulta nota.[1]

Detto ciò, osservando quindi il campo di moto sul dorso si potrà notare la formazione di due vortici di grandi dimensioni, i quali copriranno l'intera lunghezza dell'ala, e di due di piccole dimensioni. I primi saranno quelli che maggiormente influenzeranno il flusso sulla superficie alare e che quindi produrranno la depressione responsabile dell'incremento della portanza. (Figura 1.1) Risulta ora doveroso fare alcuni commenti sulla distribuzione di pressione relativa al dorso dell'ala. Partendo dal centro si potranno quindi notare tre differenti regioni: una caratterizzata da andamento costante seguita da un incremento di depressione che giunge infine ad una regione con marcata decelerazione, quest'ultima è responsabile della generazione del secondo vortice.

Fino ad ora si è sempre parlato di bordo d'attacco, in realtà sarebbe stato più appropriato chiamarlo bordo d'uscita. Infatti andando ad indagare lo stallo ci si potrà rendere conto che il comportamento di questa parte dell'ala in realtà è molto simile a quello che, per le ali classiche è generalmente chiamato per l'appunto bordo d'uscita. Se si osserva il modo con cui le ali a

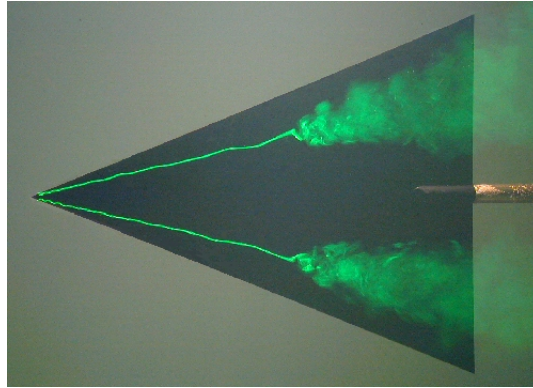


Figura 2: Visualizzazione dell'esplosione del vortice portante (Immagine tratta dal sito della Defence Science and Technology Organisation - Melbourne)

delta operano, è normale avere qualche dubbio sui meccanismi che producono lo stallo, soprattutto se si conosce il motivo, ovvero la separazione del flusso, per cui le ali classiche stallano. Generalmente l'improvvisa riduzione della portanza si ha in seguito, come già detto, alla perdita di adesione dello strato limite dalle superfici alari, mentre nelle ali a delta ciò è dovuto a quello che in genere viene chiamato esplosione del vortice portante (Figura 1.2). Ovvero la formazione di instabilità che portano al collasso della struttura vorticoso. Questo fenomeno è legato in modo particolare all'angolo di freccia, più che al numero di Reynolds. Permettendoci di legare l'angolo d'incidenza di stallo con quello già citato, ed è proprio per questo motivo che l'affermazione precedente sul nome appropriato per il bordo dell'ala, risulta giustificata. Inoltre ciò chiarisce maggiormente la scelta di bordi affilati, che per l'appunto nelle ali senza o con ridotto angolo di freccia corrisponde proprio con quello d'uscita.

Il seguente documento ha quindi lo scopo di chiarire in che modo il modello interagisce con il flusso e se è possibile effettuare correzioni sulle condizioni al contorno per poter migliorare i risultati ottenuti. Per fare ciò è necessario capire in che modo il modello induce sul flusso uniforme e sulle pareti; dopodiché, modificando la forma della camera di prova, si procederà alla verifica dei dati ottenuti mediante un confronto tra prova sperimentale e modello matematico. In questo modo sarà anche possibile verificare che, in determinate condizioni, è possibile effettuare delle correzioni direttamente a livello sperimentale senza necessariamente trattare numericamente e a posteriori i dati ottenuti.

Capitolo 1

L'impianto di prova e il sistema di misura

L'impianto necessario alle prove , come si può intuire dall'introduzione, è una galleria del vento a circuito aperto. La peculiarità di questo sistema però è la possibilità di muovere entrambe le pareti laterali della camera di prova. In realtà l'apparato originale era munito di una sola parete mobile , parte del lavoro svolto è stato proprio quello di permettere anche al lato opposto, a quello esistente, di muoversi. Chiaramente le tecnologie utilizzate sono state le medesime , per evitare eventuali disparità di comportamento.

La galleria sarà quindi composta , nell'ordine,dalle seguenti parti:

- convergente o imbocco , questo componente è stato costruito in legno con sezione iniziale di 580 x 580 mm e sezione finale di 150 x 150
- camera di prova con pareti mobili, affiancate da una schiera di 10 (11 di cui uno non utilizzato) motori ciascuna. La camera di prova è composta da due piani in resina acrilica trasparente , per permettere di poter osservare l'interno dell'impianto; la base ha dimensioni 1000 x 1500 x 15 mm mentre il piano superiore , con scopo di chiusura, è di 495 x 1500 x 15 mm. Oltre a questi due , ovviamente, sono presenti le due pareti deformabili in compensato di betulla delle dimensioni di 1440 x 150 x 0.4 mm. Dotate di 14 prese di pressione sul lato dorso e 15 sul lato ventre. Inizialmente erano previste 16 prese per lato, ma è stato necessario eliminarne alcune per permettere l'introduzione del supporto del modello. Come si potrà notare il piano inferiore è di dimensioni maggiori rispetto a quello superiore, questa scelta è stata fatta per permettere il fissaggio dei motori, dell'imbocco e del divergente. In origine erano state previste altre due piastre aggiuntive , le quali avevano il solo scopo di fissare ulteriormente i motori. Nel caso in esame si è pe-

6 CAPITOLO 1. L'IMPIANTO DI PROVA E IL SISTEMA DI MISURA

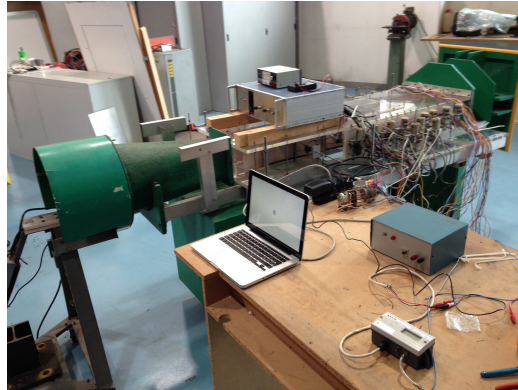


Figura 1.1: Vista della galleria del vento utilizzata per la prova, strumentazione compresa

rò deciso di non utilizzarle per permettere un miglior accesso alla zona motori , notando soprattutto che tale scelta non inficiava la bontà della prova.

- divergente o diffusore, questo componente è stato costruito in materiale composito, raccorda la sezione quadrata della camera di prova con la sezione circolare dell'anello in cui è contenuta la ventola di aspirazione. La lunghezza è di 500 mm e il rapporto di contrazione è di 3,35. I motori utilizzati per muovere le pareti sono tutti alimentati in c.c., sono motori Mabuschi RS-540 E, alimentati a 6-12 V e con assorbimento di 2,65 A. La coppia massima erogabile è 5,1 kg mm.
- ventola di aspirazione, si tratta di una semplice ventola di materiale plastico con pale fisse calettata sull'albero motore. Tale motore di tipo monofase asincrono è caratterizzato da: tensione di alimentazione 220 V a 50 Hz, assorbimento 2,5 A, potenza 440 W e velocità di rotazione a 50 Hz 2820 giri/min (velocità regolabile tramite un inverter comandato in frequenza). Come già accennato al punto precedente la ventola è circondata da un anello in legno del diametro di 310 mm.

Per maggiori dettagli costruttivi riguardanti l'impianto appena descritto si rimanda a [2]

1.1 Il restauro

L'apparato sperimentale allo stato dell'arte precedente al presente lavoro , era dotato, in camera di prova, di una parete mobile e di una parete fissa.

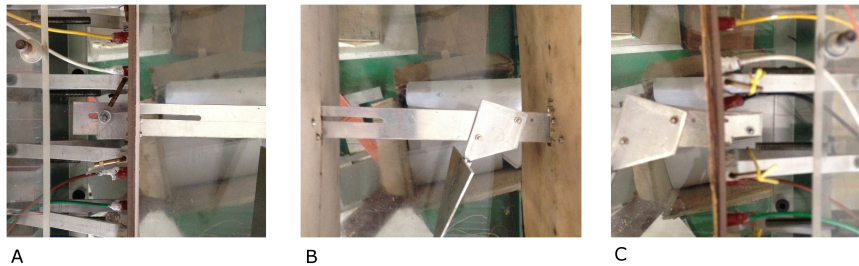


Figura 1.2: Supporto modello : (A) Collegamento supporto parete lato dorso , (B) Vista del supporto all'interno della camera di prova, (C) Collegamento supporto parete lato ventre

poichè l'indagine del campo di moto del modello preso in esame necessitava la presenza di due pareti mobili, per la modifica delle condizioni al contorno e la riduzione dell'errore sulla forma delle linee di corrente, si è deciso di introdurre ciò che di cui al momento la galleria era sprovvista. Perciò sono stati introdotti altri 11 motori e la seconda parete , quest'ultima delle medesime dimensioni, con i supporti degli attuatori e le prese di pressione perfettamente speculari alla prima.

Inoltre sono stati aggiunti sistemi per la selezione e il controllo dei motori e una presa di pressione appena a valle dell'imbocco per la rilevazione della pressione dinamica del flusso considerato indisturbato.

1.1.1 Il supporto del modello

Per poter introdurre il modello in camera di prova si è deciso di supportarlo con due piastre sovrapposte rettangolari di alluminio. Entrambe presentano un foro passante di forma rettangolare, i cui lati minori sono stati sostituiti da due archi di cerchio. Il supporto è fissato sulla parete in corrispondenza del ventre del modello da due semplici staffe; mentre sull'altra parete le staffe presentano un foro passante , nel quale è alloggiato un bullone che attraversa anche le due piastre e, mentre risulterà fissato alle al supporto, potrà muoversi di moto relativo rispetto alle piastre. Ciò permette lo spostamento, grazie al fissaggio sulla parete "inferiore" e il mantenimento del centro vena, da parte del modello, grazie al grado di libertà relativo tra piastre e staffe sulla parete "superiore". Infine si è fissato il modello sul supporto con un'ulteriore piastra che permettesse di posizionare il modello a 15° e 25° di incidenza.

1.1.2 Il posizionamento delle pareti

Per quanto riguarda il movimento della parete, avendo scelto di non sfruttare una procedura automatica ma manuale, è stato necessario produrre un sistema di controllo ad hoc. Quest'ultimo oltre a permettere l'alimentazione del motore tramite un pulsante, permette anche all'utente di scegliere la direzione in cui si vuole muovere il tratto di parete selezionato, tramite un selettore a due posizioni. Infine a ciascun motore è associato un potenziometro che servirà per il rilevamento della posizione. Per capire come viene effettuata la selezione del motore e del potenziometro corrispondente, si rimanda ai paragrafi successivi. Infine per maggiori dettagli sulla trasmissione del movimento da parte del motore si veda [2]

1.1.3 La selezione dei motori

Quindi per poter comandare le pareti e ottenere i dati relativi a ciascun potenziometro si è dovuto provvedere alla costruzione di un sistema ad hoc di selezione. Quest'ultimo è composto da tre selettori, collegati sia all'alimentazione di motori e potenziometri che all'uscita di questi ultimi, il tutto visualizzato su un comune tester con display digitale a tre cifre decimali di precisione. La scelta del numero di selettori è stata fatta dando credito alle seguenti considerazioni. Ciascun selettore è di tipo rotazionale a 6 posizioni e 2 vie per disco di selezione, ciò permette sia l'alimentazione dei potenziometri che dei motori. A ciascuna delle posizioni è associata l'uscita del potenziometro corrispondente. Ogni selettore ha un massimo di tre dischi quindi ognuno di essi dà la possibilità di controllare 18 tra motori e potenziometri. Quindi essendo 22 motori si è deciso di suddividerli in 4 gruppi da 6 (lasciando quindi libere due posizioni) e collegarli a due dei tre selettori, per la scelta del singolo motore, infine l'ultimo lo si è utilizzato per la selezione del gruppo di motori d'interesse.

1.1.4 La selezione delle prese di pressione

Oltre a ciò che riguarda il controllo meccanico della galleria è stato introdotto un'ulteriore sistema di selezione delle prese di pressione, necessarie per le misure di velocità. Quest'ultimo è composto da una scanivalve e da un circuito di controllo manuale, essendo, come già spiegato in precedenza, stata fatta la scelta di evitare un controllo automatico. Dunque la selezione della presa di pressione è effettuata semplicemente tramite un pulsante che agisce sulla scanivalve facendole variare il canale di input dalla parete

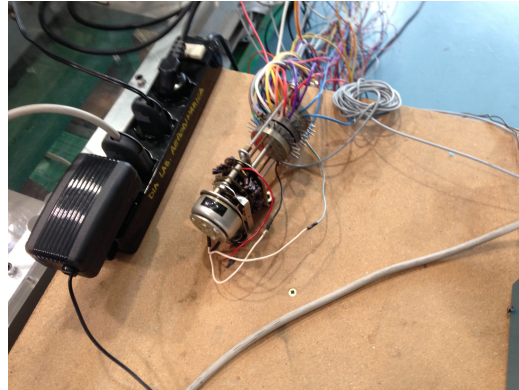


Figura 1.3: Scanivalve utilizzata per la misura delle pressioni

1.2 Il sistema di misura

1.2.1 Il rilevamento della posizione

Per quanto riguarda il posizionamento delle pareti, sarà necessario avere in ingresso ai codici di calcolo le informazioni riguardanti alla posizione. Per come è stato concepito il meccanismo di movimento [2], si è reso necessario l'utilizzo di potenziometri collegati ad ingranaggi, i quali accoppiati con altri, collegati ai supporti degli attuatori, portano alla modifica del valore di resistenza e quindi della tensione in uscita al potenziometro, quest'ultima convertita tramite fattore di conversione 1 V/cm produce la misura di posizione relativa, rispetto alla situazione indeflessa.

1.2.2 Le misure di pressione

Per indagare il campo di moto e riuscire ad ottenere i dati relativi alla pressione a parete e quindi di conseguenza, sfruttando il teorema di Bernoulli, relativi alle velocità, utili per il calcolo dello spostamento necessario, si è scelto di utilizzare 16 prese di pressione a parete per ciascuno de due lati mobili della camera di prova. Inoltre essendo il tratto prossimo al modello maggiormente influenzato dalla presenza di quest'ultimo, è stato deciso di infittire il numero di punti di misura. Purtroppo per far spazio al supporto è stato necessario sacrificare le prese di pressione in concomitanza con quest'ultimo. Quindi si avrà un totale di 29 punti di misura contro i 32 previsti.

Capitolo 2

La modellizzazione

Prima di procedere con la prova è stato necessario produrre un software che permettesse di calcolare gli spostamenti delle pareti, necessari per effettuare tutte le correzioni delle condizioni al contorno della prova.

2.1 La discretizzazione

Si è inizialmente partiti dalla domanda di come muovere la parete, cercando di avere maggior controllo nelle aree di interesse, ovvero quelle nei dintorni del modello. La considerazione che ha guidato la scelta di posizione e numero di collegamenti ai motori è stata la seguente: poiché il campo di moto risulta, come ovvio che sia, più influenzato nelle vicinanze del modello è inevitabile l'infittimento dei punti di movimento per poter seguire con la maggior precisione possibile le linee di flusso. Infatti dovendo discretizzare la parete, la quale dovrà seguire tali linee, è necessaria un'interpolazione, inoltre per poter produrre un andamento il più fedele possibile è necessario aumentare i punti da interpolare laddove ci si aspetta variazioni di pendenza. Perciò scegliendo come punti d'interpolazione la posizione dei supporti è ovvio il conseguente infittimento in prossimità del modello.

2.2 Il metodo a potenziale e lo spostamento delle pareti

Dopodichè ci si è posti il problema di come effettivamente calcolare l'andamento delle linee di flusso. Poichè si è scelto di introdurre un modello in un flusso d'aria lineare, in condizioni ambientali e regimi di velocità tali da considerare il flusso quasi come incomprimibile, si è deciso di sfruttare la teoria

a potenziale. Per la determinazione delle posizioni delle sorgenti, così da poterle calcolare l'intensità quindi il flusso e infine lo spostamento, si rimanda ai paragrafi successivi. Perciò data la misura di pressione, tramite il teorema di Bernoulli, è possibile calcolare la velocità, partendo dall'espressione della pressione dinamica

$$p_{din_i} = \frac{1}{2} \rho v_i^2 \quad (2.1)$$

essendo p_{din_i} la pressione dinamica misurata nel singolo punto, v_i la velocità nel punto di misura e ρ la densità. Si può ottenere la velocità in corrispondenza del punto di misura

$$v_i = \sqrt{\frac{2p_{din_i}}{\rho}} \quad (2.2)$$

Ottenuto tale valore e nota la velocità del flusso è quindi possibile calcolare la velocità indotta dalla sorgente

$$v_{ind_i} = v_i - v_\infty \quad (2.3)$$

con v_{ind_i} velocità indotta in corrispondenza della singola presa di pressione e v_∞ velocità del flusso.

Prima di procedere è bene fare una considerazione: per poter calcolare l'intensità delle sorgenti è possibile sfruttare un metodo a pannelli basato sulla teoria a potenziale, poichè l'utilizzo delle definizioni rende il calcolo oneroso e non è detto che si conosca ogni parametro necessario. In tutti i casi per chi volesse comprendere meglio quest'ultima affermazione si faccia riferimento al capitolo 4 di [3]. A questo punto, nota la velocità indotta in ciascun punto di misura, è possibile impostare il seguente problema agli autovalori

$$\sigma = \mathbf{A} \mathbf{v}_{ind} \quad (2.4)$$

dove sarà σ il vettore contenente le intensità, \mathbf{A} una matrice di fattori geometrici dipendente dalla posizione delle sorgenti e \mathbf{V}_{ind} il vettore delle velocità indotte, calcolate in corrispondenza delle prese di pressione. Particolare attenzione va rivolta ora a quella che è stata definita come matrice di fattori geometrici, quest'ultima è stata calcolata tramite il procedimento seguente: in primis, come si può dedurre da quanto sopra, si è decisa la posizione delle sorgenti chiamando l'ascissa di tale posizione punto di collocazione, dopodiché si è proceduto al calcolo dei termini di \mathbf{A} . Il criterio di scelta dei punti di collocazione è stato il seguente, nota l'ascissa dei nodi dei pannelli, che come già spiegato coinciderà con i punti in cui è fissato

2.2. IL METODO A POTENZIALE E LO SPOSTAMENTO DELLE PARETI 13

il supporto di movimento, si è deciso di posizionarle a metà dei pannelli stessi.

Avendo ora N numero di pannelli e N numero di sorgenti sarebbe lecito pensare di procedere con il calcolo, in realtà essendo la matrice dei coefficienti geometrici dipendente, come si vedrà in seguito, dal numero dei nodi, i quali sono $N+1$, ovvero si ha un problema sovradeterminato, si è reso necessario introdurre un'ulteriore sorgente a monte dei pannelli. Ripristinato il bilancio dei punti è ovvio procedere con il calcolo, ma sorge un'altro problema: nel computo delle intensità ci si rende conto che l'area sottesa dalla curva dell'andamento di queste ultime mostra uno sbilanciamento in corrispondenza della sorgente aggiunta, ciò provoca un errore nel successivo calcolo dei flussi (i quali rappresentano l'integrale delle intensità) e quindi degli spostamenti. Per correggere tale errore viene aggiunta un'ulteriore sorgente a valle dei pannelli, la quale però produce uno sbilanciamento del numero di punti per il calcolo dei termini di \mathbf{A} e quindi una sottodeterminazione nel problema agli autovalori. Per ritornare ad un problema determinato si introduce un'equazione aggiuntiva a chiusura del problema, ovvero ponendo l'ultimo termine di ciascuna riga di A , $a_{i,N+1}$, pari a 1 e la $v_{ind_{N+1}}$ pari a zero, essendo quest'ultima comunque prossima a tale valore anche nel caso reale, si impone di fatto l'annullamento della sommatoria delle intensità, determinando quindi l'equazione aggiuntiva ricercata. Senza indugiare oltre di seguito è mostrato il procedimento appena descritto.

- Dati i nodi dei pannelli, si determinano i punti di collocazione

$$x_{coll_1} = x_1 - \frac{(x_2 - x_1)}{2} \quad (2.5)$$

l'espressione sopra è la posizione della sorgente a monte dei pannelli

$$x_{coll_i} = x_i - \frac{(x_i - x_{i-1})}{2} \quad \text{con } i = 1..N \quad (2.6)$$

$$x_{coll_{N+1}} = x_N - \frac{(x_N - x_{N-1})}{2} \quad (2.7)$$

che è la posizione della sorgente a valle dei pannelli. La variabile x_{coll_i} è l' i -esimo punto di collocazione e x_i è l' i -esimo nodo del pannello

- Dati i punti di collocazione si procede con il calcolo dei termini di \mathbf{A}

$$a_{i,j} = \frac{1}{x_i - x_{coll_j}} \quad \text{con } i = 1..N \text{ e } j = 1..N \quad (2.8)$$

$$a_{i,N+1} = \frac{1}{x_i - x_{coll_{N+1}}} \quad \text{con } i = 1..N \quad (2.9)$$

- Aggiunta equazione di chiusura

$$a_{N+1,i} = 1 \quad \text{con } i = 1..N \quad (2.10)$$

$$v_{ind_{N+1}} = 0 \quad (2.11)$$

le quali di conseguenza portano a

$$\sum_{i=1}^{N+1} \sigma_i = 0 \quad (2.12)$$

- Calcolo vettore dei flussi

$$\mathbf{q} = \sigma 2\pi \quad (2.13)$$

dove \mathbf{q} è il vettore contenete il flusso di ciascuna sorgente

- Calcolo degli spostamenti

$$\delta_i = \frac{\sum_{k=1}^i q_k}{2} \frac{1}{v_i} \quad \text{con } i = 1..N \quad (2.14)$$

dove δ_i rappresenta lo spostamento in ordinata dell'i-esimo punto di collocazione

Per quanto è stato detto fino ad ora è naturale che sorga il dubbio di come effettivamente muovere le pareti noti solo gli spostamenti delle sorgenti. La soluzione è abbastanza semplice, è sufficiente un'interpolazione avendo conoscenza sia della posizione dei nodi che dei punti di collocazione. Pur essendo già sufficiente un interpolazione lineare, si è comunque scelto di sfruttare spline cubiche in modo da ottenere risultati più raffinati e più precisi.

2.3 Verifica del metodo, utilizzo di un caso noto

Per verificare il corretto funzionamento del metodo e per avere conferma delle considerazioni fatte sopra, si è deciso di sfruttare il codice di calcolo per indagare il campo di moto attorno ad un cilindro di lunghezza infinita. Tale scelta è stata fatta poiche il caso oltre a prestarsi bene ad un metodo a potenziale ha soluzione analitica nota in condizioni incomprimibili. Infatti nota la distanza tra cilindro e pannello

$$r = \frac{x}{\cos \theta} \quad (2.15)$$

e la quantità

$$a = \sqrt{\frac{\mu}{\cos(2\pi v_\infty)}} \quad (2.16)$$

che in questo caso rappresenta il raggio della base del cilindro. Dove si è indicato con : μ l'intensità della doppietta che rappresenta la base del cilindro, v_∞ la velocità asintotica della corrente, r la distanza , x la coordinata in ascissa e θ l'angolo compreso tra x ed r . Si possono calcolare le componenti, in coordinate cilindriche, della velocità totale attorno al cilindro, comprensiva quindi della velocità indotta da quest'ultimo

$$u_r = v_\infty \left(1 - \frac{a^2}{r^2}\right) \cos \theta \quad (2.17)$$

$$u_\theta = -v_\infty \left(1 + \frac{a^2}{r^2}\right) \sin \theta \quad (2.18)$$

note le componenti si può procedere al calcolo della velocità totale

$$U = \sqrt{u_r^2 + u_\theta^2} \quad (2.19)$$

e quindi calcolare la pressione dinamica, che sostituirà, nella simulazione, la misura della pressione

$$p_{din} = \frac{1}{2} \rho U^2 \quad (2.20)$$

Per la simulazione si ipotizza una camera di prova di 1 m di lunghezza e 0.2 m di apertura, con preti di 49 pannelli, ovvero 50 nodi. Per quanto riguarda il sistema di riferimento lo si è scelto di tipo ortogonale centrato nel centro della circonferenza che rappresenta la base del cilindro I dati del problema ideale , necessari per produrre la soluzione cercata sono riportati in Tabella 2.1. Si ricorda che N è il numero di nodi corrispondenti agli estremi

Tabella 2.1: Parametri simulazione

Parametro	Valore
N	50
μ	0.1885
v_∞	1

dei pannelli.

Tale metodo produce quindi i valori di pressione che simulano una misurazione a parete. In seguito , per il calcolo degli spostamenti si sfrutta il codice descritto nei paragrafi precedenti. La simulazione produce quanto riportato in Figura 2.1 - 2.2 -2.3.

In Figura 2.1 si può notare di come l'integrale della curva sia zero ovvero sia stata rispettata la condizione aggiuntiva imposta per la chiusura del problema e siano stati risolti i problemi legati all'andamento di tale valore

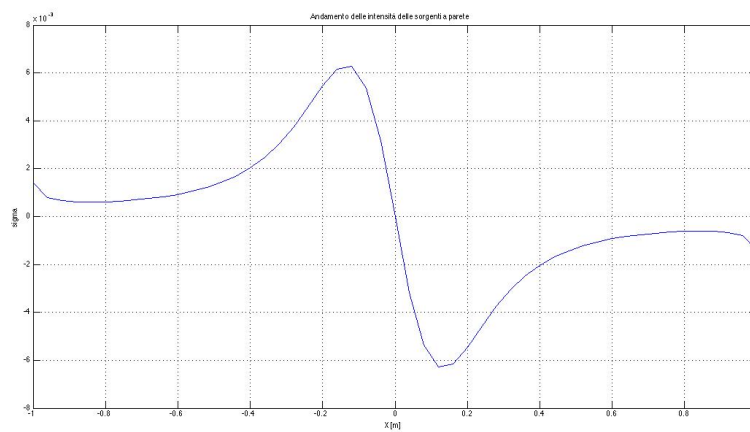


Figura 2.1: Grafico andamento delle intensità delle sorgenti

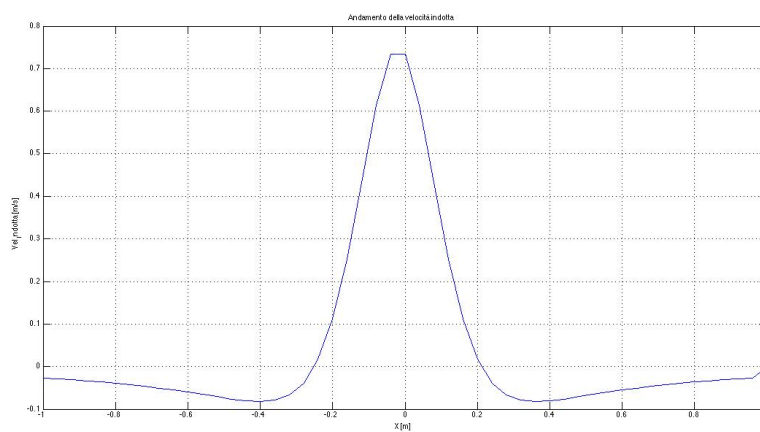


Figura 2.2: Andamento velocità indotta

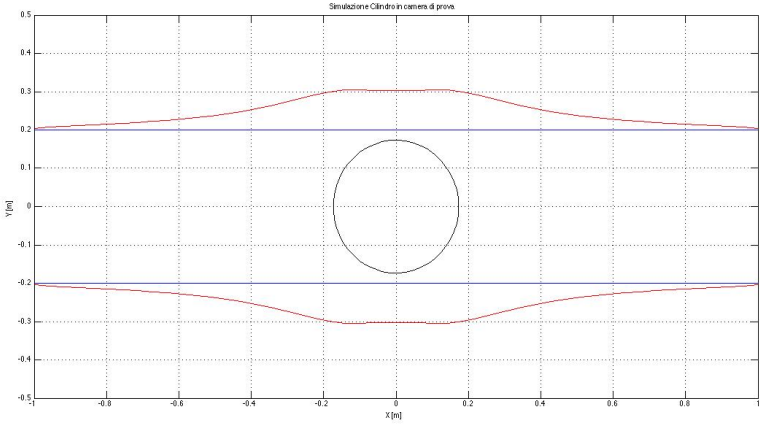


Figura 2.3: Configurazione iniziale e finale della camera simulata

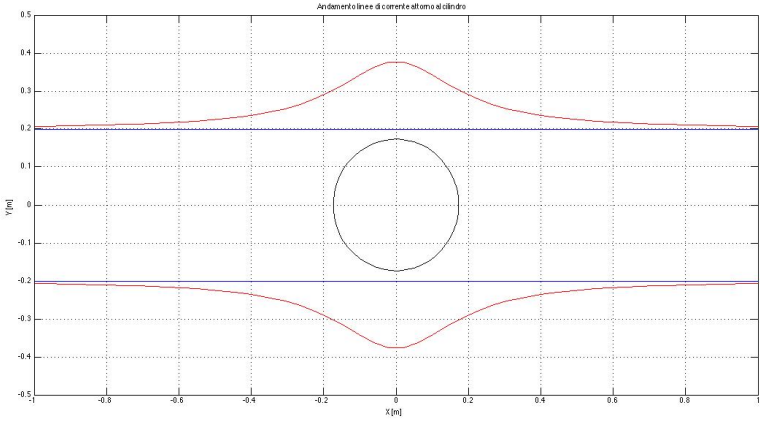


Figura 2.4: Andamento linee di corrente attorno al cilindro simulato

, indicato al paragrafo precedente, la tendenza asintotica a 0 in prossimità di primo e ultimo nodo viene a mancare a causa di errori numerici. Mentre è possibile osservare in Figura 2.2 il vincolo imposto $v_{ind} = 0$ in prossimità dell'ultimo nodo, per permettere la chiusura del problema. A parte questo dettaglio si può notare come l'andamento di tale velocità sia indice di una maggiore induzione in prossimità del cilindro. Infine osservando la Figura 2.3 si può concludere che effettivamente il metodo produce spostamenti molto prossimi all'andamento delle linee di corrente Figura 2.4

Capitolo 3

Il procedimento d'indagine e l'esecuzione della prova

Dopo aver presentato nel complesso la strumentazione e i modelli utilizzati verrà ora spiegato come è stata effettuata la prova e in seguito verranno presentati i dati ottenuti.

3.1 L'esecuzione della prova

Per eseguire la prova si è scelto un metodo iterativo, partendo da configurazione indeformata e procedendo ad ogni passo a deformazioni successive delle pareti fino ad arrivare a convergenza. Quindi partendo da pareti rettilinee si procede alla rilevazione delle pressioni, in primis quella relativa al flusso indisturbato e in seguito quelle relative a ciascuna delle prese di pressione, prima lato ventre poi lato dorso. In realtà la prova prevedeva di sfruttare come pressione dinamica di riferimento, ovvero quella di corrente inalterata, la prima presa dinamica del lato ventre. Questa scelta risulta efficiente solo nelle prime due iterazioni poichè, come verrà di seguito presentato, le deformazioni in prossimità dell'imbocco risultano minime o nulle. In seguito, con la terza iterazione, si nota che la fluttuazione di tale valore di pressione porta alla conclusione che tale misura non può essere relativa ad un flusso indisturbato. Da qui la scelta di aggiungere una presa subito a valle dell'imbocco. A causa di piccole oscillazioni dei valori misurati si sceglie comunque di mediare, per ogni presa, su 10 valori.

Dopo la prima serie di misure si procede al calcolo degli spostamenti, attraverso un codice di calcolo, reperibile nell'appendice A. Producendo i primi modelli di pareti deformate. Successivamente ci si pone effettivamente nella prima configurazione indeformata e si procede alla successiva rilevazione

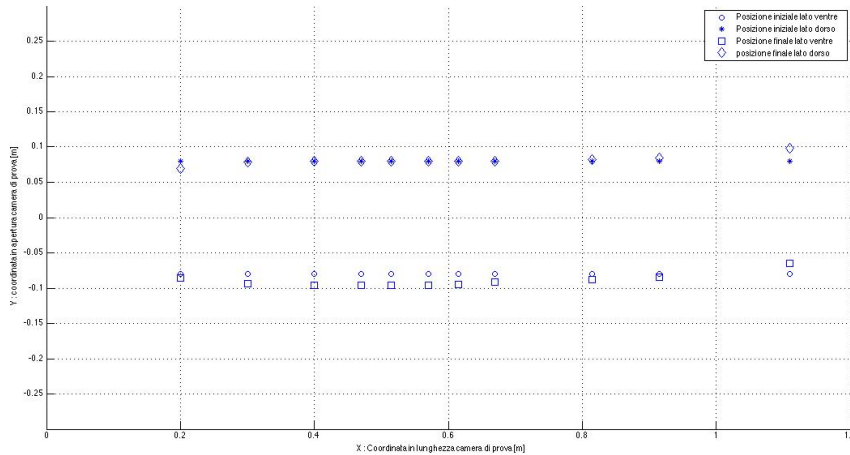


Figura 3.1: Pareti deformate dopo la prima iterazione con modello a 15° , il sistema di riferimento è un sistema ortogonale di assi con ascissa corrispondente alla lunghezza della camera di prova con origine sull'uscita dell'imbocco, l'ordinata corrisponde all'apertura e ha origine in mezzeria

delle pressioni. Chiaramente il procedimento viene via via ripetuto per ogni nuova configurazione.

Dopo aver effettuato questa prima prova corrispondente all'inclinazione del modello di 15° si ripete il procedimento variando l'incidenza e portandola a 25° .

3.2 Commenti sul criterio di convergenza

Dal paragrafo precedente non risulta chiaro il criterio con cui arrestare il procedimento iterativo. Di fatto prima di parlare di ciò è doveroso fare alcune considerazioni. La galleria è stata concepita in origine basandosi su impianti di dimensioni simili per l'indagine in regime transonico, la prova effettuata però è a regime incomprimibile il che comporta un'eccessiva lunghezza della camera di prova, ciò porta a delle imprecisioni nel calcolo degli spostamenti dei nodi più a monte e a valle del modello.

Inoltre come già accennato, nell'introduzione, non linearizzando in alcun modo il flusso in ingresso al convergente e considerando il fatto che la ventola introduce una componente di velocità perpendicolare alla direzione del flusso, in prossimità di questi due elementi si hanno delle ulteriori imprecisioni, soprattutto a pareti deflesse.

Infine è doverosa anche una considerazione sul materiale con cui sono state realizzate le pareti. Il compensato di betulla è un materiale che è stato scelto per la sua flessibilità, ma proprio questa sua caratteristica introduce alcuni problemi nelle zone in cui il numero degli attuatori è inferiore, di fatto si avrà una modifica della sezione proprio in quelle zone che, come verrà fatto notare anche in seguito, introducono errori non trascurabili nella misura della velocità e quindi nel calcolo dello spostamento.

Fatte le considerazioni sopra, è ora necessario stabilire quando arrestare il metodo. A causa delle imprecisioni la scelta di una condizione di arresto unica è impraticabile, ma non essendo note le entità delle perturbazioni introdotte una condizione per ciascun nodo è comunque una strada non percorribile quindi si è deciso di arrestare il metodo sfruttando delle considerazioni qualitative di carattere grafico, le quali come si vedrà anche in seguito, saranno ovvie anche senza un vero e proprio riscontro numerico.

3.3 I Dati ottenuti

Tabella 3.1: Pressione dinamica di riferimento per prove a 15°

	Prova 1 [Pa]	Prova 2 [Pa]	Prova 3 [Pa]	Prova 4 [Pa]
p_{din}	439.30	328.80	309.12	402.53

Le prove sono condotte a 50 Hz in condizioni atmosferiche standard. Per quanto riguarda le prove con modello posto a 15° d'incidenza i valori di pressione ricavati dalle misurazioni sono indicati in Tabella 3.1 per il lato ventre e in Tabella 3.2 per il lato dorso

Come già spiegato in precedenza, a causa della presenza del supporto si sono sacrificate alcune prese di pressione quindi per quanto riguarda i valori mancanti, si è supposto che in assenza di supporto la pressione passi in modo graduale da l'ultimo valore noto prima dell'interruzione al primo valore dopo di essa. L'interferenza del supporto sulla presa di pressione che lo segue non in questo caso non è stata considerata poichè si è notato non essere eccessivamente elevata. Perciò si è scelto di sfruttare un valore medio. Inoltre è necessario, per operare con valori adimensionali, calcolare il coefficiente di pressione per ciascuna presa. Tabella 3.4 e Tabella 3.5. Una volta reperiti tutti gli ingredienti necessari si può procedere con il calcolo delle deformazioni così da poter effettivamente verificare quanto detto sino ad ora.

Per aver ulteriore conferma delle affermazioni fatte può risultare utile eseguire ulteriori prove ad incidenza diversa. Infatti il passo successivo è

22CAPITOLO 3. IL PROCEDIMENTO D'INDAGINE E L'ESECUZIONE DELLA PROVA

Tabella 3.2: Misure di differenze di pressione lato ventre ad incidenza 15°

Presa	Prova 1 [Pa]	Prova 2 [Pa]	Prova 3 [Pa]	Prova 4 [Pa]
1	439.30	344.49	293.92	387.08
2	399.22	308.62	249.92	355.95
3	395.37	301.90	246.04	339.51
4	371.37	299.65	220.03	310.86
5	372.05	280.97	212.56	301.65
6	362.76	254.07	201.21	283.64
7	363.22	248.09	203.70	287.20
8	342.61	240.62	199.27	298.91
9	367.29	308.75	205.50	311.36
10	500.44	376.87	211.73	342.99
11	391.98	289.69	238.30	376.62
12	395.60	289.94	510.91	403.27
13	413.71	299.16	276.21	419.71
14	472.36	326.80	280.64	419.72
15	505.65	375.13	314.41	482.24
16	548.00	582.12	545.12	682.50

Tabella 3.3: Misure di differenze di pressione lato dorso ad incidenza 15°

Presa	Prova 1 [Pa]	Prova 2 [Pa]	Prova 3 [Pa]	Prova 4 [Pa]
1	353.93	328.80	230.55	347.23
2	420.05	290.94	241.62	361.43
3	454.25	340.01	260.99	389.82
4	447.00	342.35	234.42	362.67
5	451.08	358.19	235.53	365.16
6	425.26	338.51	234.97	351.71
7	418.92	308.37	234.42	357.94
8	420.05	272.50	249.09	381.60
9	419.49	311.49	256.70	396.05
10	419.49	311.49	256.70	396.05
11	418.92	350.47	265.31	411.50
12	414.39	342.00	270.12	413.49
13	435.23	350.22	287.01	428.18
14	473.27	389.82	308.32	474.01
15	501.12	392.07	288.94	452.10
16	557.51	494.19	403.52	574.89

Tabella 3.4: coefficiente di pressione lato ventre ad incidenza 15°

Presa	Prova 1	Prova 2	Prova 3	Prova 4
1	1.00	1.04	0.93	0.95
2	0.90	0.93	0.81	0.87
3	0.90	0.91	0.80	0.83
4	0.84	0.90	0.69	0.76
5	0.84	0.85	0.66	0.74
6	0.82	0.76	0.63	0.69
7	0.82	0.75	0.64	0.71
8	0.77	0.72	0.64	0.70
9	0.96	0.93	0.66	0.73
10	1.14	1.14	0.68	0.76
11	0.89	0.87	0.76	0.84
12	0.90	0.87	0.81	0.92
13	0.94	0.90	0.88	0.99
14	1.07	0.99	0.87	1.03
15	1.15	1.13	1.02	1.19
16	1.25	1.77	1.76	1.68

Tabella 3.5: coefficiente di pressione lato dorso ad incidenza 15°

Presa	Prova 1	Prova 2	Prova 3	Prova 4
1	0.80	0.99	0.73	1.39
2	0.95	0.88	0.77	1.45
3	1.03	1.03	0.81	1.57
4	1.01	1.03	0.73	1.46
5	1.02	1.08	0.73	1.47
6	0.96	1.02	0.74	1.41
7	0.95	0.93	0.73	1.44
8	0.95	0.82	0.81	1.53
9	0.95	0.94	0.84	1.59
10	0.95	0.94	0.84	1.59
11	0.95	1.05	0.86	1.65
12	0.94	1.03	0.88	1.66
13	0.99	1.06	0.94	1.72
14	1.07	1.18	1.03	1.90
15	1.14	1.19	0.92	1.82
16	1.27	1.50	1.32	2.31

24CAPITOLO 3. IL PROCEDIMENTO D'INDAGINE E L'ESECUZIONE DELLA PROVA

Tabella 3.6: Misure di differenze di pressione lato ventre ad incidenza 25°

Presa	Prova 5 [Pa]	Prova 6 [Pa]
1	339.48	326.06
2	326.31	296.91
3	322.32	301.65
4	302.14	284.71
5	257.31	286.95
6	263.79	269.09
7	263.54	250.83
8	263.29	232.47
9	278.98	246.60
10	293.68	263.79
11	348.48	322.32
12	357.94	321.32
13	385.84	332.28
14	424.20	390.32
15	474.76	451.35
16	676.03	686.24

Tabella 3.7: Misure di differenze di pressione lato dorso ad incidenza 25°

Presa	Prova 5 [Pa]	Prova 6 [Pa]
1	353.21	337.52
2	352.21	320.33
3	387.33	353.71
4	361.68	332.78
5	363.67	354.95
6	369.39	343.74
7	385.34	341.25
8	408.51	357.69
9	413.49	368.65
10	413.49	368.65
11	419.22	380.11
12	420.21	366.16
13	439.39	385.84
14	469.28	457.33
15	464.30	431.42
16	577.63	628.70

Tabella 3.8: coefficiente di pressione lato ventre ad incidenza 15°

Presa	Prova 5 [Pa]	Prova 6 [Pa]
1	0.87	0.79
2	0.83	0.72
3	0.82	0.73
4	0.77	0.69
5	0.65	0.70
6	0.67	0.65
7	0.67	0.61
8	0.67	0.56
9	0.71	0.60
10	0.75	0.64
11	0.89	0.78
12	0.91	0.78
13	0.99	0.81
14	1.09	0.95
15	1.22	1.10
16	1.74	1.69

Tabella 3.9: Coefficiente di pressione lato dorso ad incidenza 15°

Presa	Prova 5 [Pa]	Prova 6 [Pa]
1	0.90	0.82
2	0.90	0.78
3	0.99	0.86
4	0.92	0.81
5	0.93	0.87
6	0.94	0.84
7	0.99	0.83
8	1.05	0.87
9	1.06	0.90
10	1.06	0.90
11	1.07	0.93
12	1.08	0.89
13	1.13	0.94
14	1.20	1.12
15	1.19	1.05
16	1.48	1.54

proprio quello di variare tale angolo e porlo a 25° . Questo valore è presumibilmente prossimo all'equivalente in corrispondenza , o oltre, allo stallo. Infatti senza voler anticipare troppo , ci si accorgerà che i risultati che si otterranno evidenzieranno un comportamento che potrebbe confermare questa affermazione. In tabella sono riportati i dati equivalenti alla prova precedente, purtroppo ci si è dovuti fermare solo alla prima iterazione, poichè gli spostamenti richiesti per effettuare la prova successiva eccedevano il fondo corsa dei supporti.

3.3.1 Commenti sulle prese mancanti e in prossimità degli estremi della camera di prova

In precedenza è stata fatta un'affermazione. Ovvero che in mancanza delle misure di pressione in corrispondenza del supporto, si sarebbero usati dei valori medi sfruttando le pressioni dinamiche a cavallo della discontinuità, si cercherà ora di capire se questa affermazione può essere ritenuta valida.

Osservando i dati relativi ai coefficienti di pressione, Tabelle 3.4 , 3.5 , 3.8, 3.9 , possiamo notare che fatta eccezione per i coefficienti relativi alla parete lato ventre della prima e seconda prova , la variazione di tale valore è nell'ordine delle variazioni che si hanno tra prese vicine, lontano dal modello. Quindi l'utilizzo di tale valor medio può ritenersi giustificato, anche in virtù dei risultati ottenuti , presentati nel paragrafo successivo.

Inoltre è doveroso fare anche un'ultima considerazione sull'argomento. Osservando i dati dei coefficienti di pressione relativi alla presa 16 di ambo i lai, in tutte le prove si può notare una marcata variazione rispetto alla presa precedente; questo porta a confermare che l'eccessiva flessibilità delle pareti in corrispondenza di tali punti, introduce errori sulla pressione dinamica, che però ai fini della prova non determina un'eccessivo problema in virtù della considerazione sulla lunghezza della galleria fatta nei paragrafi precedenti.

3.4 I risultati

Ottenute le misure necessarie ai codici di calcolo per elaborare la forma delle pareti è possibile ora visionare ciò che effettivamente è successo. Osservando le varie iterazioni, Figura 3.2, è evidente che una delle configurazioni è palesemente errata, questa conclusione infatti non è sbagliata , si è voluto inserire di proposito i dati relativi alla terza iterazione per porre l'attenzione sul problema della flessibilità, in corrispondenza del divergente della galleria. Come già spiegato la scelta del materiale risulta particolarmente ap-

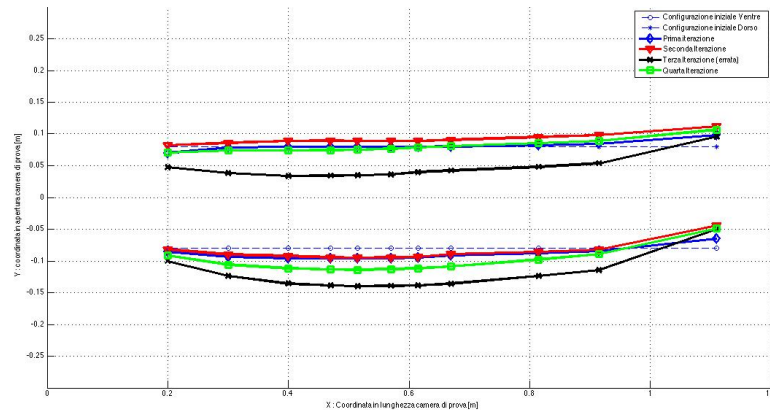


Figura 3.2: Configurazione delle pareti ad ogni iterazione per modello ad incidenza di 15°

propriata, per le sue caratteristiche, in corrispondenza del modello dove si vuole poter apprezzare anche variazioni minime di posizione, ma allo stesso tempo la decisione di sfruttare il medesimo materiale agli estremi della galleria, dove i supporti sono più radi, risulta inappropriata. In questo caso la ridotta rigidità determina una variazione di sezione e quindi, semplicemente applicando l'equazione di conservazione della massa in condizioni di incomprimibilità e di viscosità tendente a zero del flusso, una variazione della portata. Inoltre è possibile verificare questa affermazione in Tabella 3.1 dove si ha una variazione eccessiva di pressione dinamica e quindi della velocità di riferimento. In parte, **ma non in modo determinante**, si è potuto constatare il medesimo fenomeno nella seconda iterazione.

Risolto il problema sopra, riportando la parte eccessivamente deflessa delle pareti in posizione; è possibile, osservando Figura 3.2, verificare che in tre iterazioni si è effettivamente arrivati a convergenza. Soprattutto in prossimità del modello, dove i fenomeni induttivi sono più marcati. Anche in questo caso però la flessibilità delle pareti causa comunque problemi in corrispondenza del primo e ultimo nodo. Non solo, ma gli errori di tipo numerico, riscontrabili in Figura 2.1, non contribuiscono sicuramente alla convergenza del metodo. Inoltre è possibile notare anche un'altra problematica. In prossimità della parete lato ventre la convergenza risulta di ordine inferiore, ciò è dovuto al fatto che, per come è stato costruito il supporto, i movimenti delle pareti tendono a far perdere il centrovena da parte del modello. Di fatto la parete inferiore che dovrebbe allontanarsi rimane ad una distanza costante, mentre, fortunatamente, la parete superiore si comporta in modo ottimale

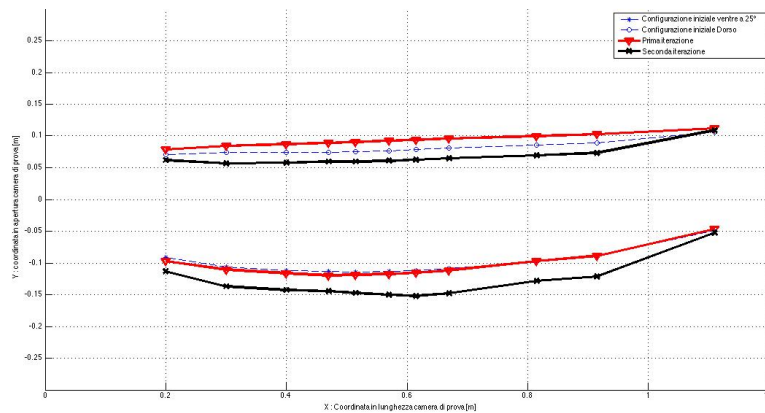


Figura 3.3: Configurazione delle pareti ad ogni iterazione per modello ad incidenza di 25°

allontanandosi in modo appropriato dal modello. Questa vicissitudine è in realtà figlia di due motivazioni: la prima di tipo aerodinamico, la seconda di tipo costruttivo. In realtà le due motivazioni sono profondamente legate, ovvero, in fase di progetto del supporto si è ipotizzato che le variazioni maggiori di posizione interessassero prevalentemente la parete lato dorso ed effettivamente è stato così. Tale ipotesi ha portato alla costruzione di un supporto che permettesse maggior libertà di movimento a tale confine. Successivamente però ci si è accorti che le variazioni della parete lato ventre erano più elevate del previsto, anche se in ultima analisi ciò non ha compromesso di fatto la prova. Una possibile miglione è quindi quella relativa al supporto.

Come fatto per il modello a 15° , per le prove a incidenza 25° si sfrutta chiaramente lo stesso modo di operare. Inizialmente però, a differenza del caso precedente, è necessario chiedersi da quale configurazione partire. La risposta sta nella metodologia classica sfruttata per metodi bidimensionali, ovvero si decide di partire da una configurazione deformata, che in questo caso coincide con quella a cui si è giunti con incidenza più bassa. Osservando il susseguirsi delle iterazioni si può notare un'oscillazione attorno alla configurazione iniziale, soprattutto per quanto riguarda il lato dorso. Ciò è dovuto al fatto che per limiti costruttivi della galleria non si può procedere con l'iterazione successiva alla seconda, ma osservando anche il comportamento del caso precedente si può supporre che, essendo simile, si possa arrivare a convergenza già alla terza iterazione al più alla quinta. Questo problema, volendo, può essere risolto sfruttando un metodo di rilassamento, essendo

questo il caso di risoluzione di un sistema lineare, e muoversi ad ogni passo di solo metà spostamento richiesto.

In questo caso però non è possibile fare molte considerazioni sulla convergenza riferita alla parete lato ventre poichè nel caso precedente i problemi sorgevano solo alla terza iterazione, si sospetta però che si possano avere problemi simili poichè le problematiche sono le medesime e in più in questo caso si hanno anche delle incertezze legate al fatto che, per alcuni punti, si è raggiunto il fondo corsa sia degli attuatori che dei potenziometri già alla prima iterazione, dovuto alla probabile separazione del modello la quale richiede una dimensione di camera maggiore rispetto ad un caso non separato; quindi tali nodi dovendo in realta essere ulteriormente spostati causano, sicuramente, errori sulla posizione richiesta alla seconda iterazione.

3.5 Le conclusioni e i possibili miglioramenti

Partendo da quanto detto sino ad ora è possibile fare alcune considerazioni. In primis è possibile affermare che effettivamente si può effettuare una correzione del prim'ordine, nel caso bidimensionale, per ridurre i problemi legati al bloccaggio e per poter effettuare una correzione sulla velocità indotta media lungo l'apertura. Affermazione giustificata dall'andamento delle prove, si veda figura 3.2. Inoltre, soprattutto in prossimità del modello, il numero di nodi e quindi degli attuatori risulta essere adeguato alle prove svolte sia in questo caso che nel caso esposto in [2].

Per quanto riguarda il metodo di calcolo della forma delle pareti, esso risulta funzionare nel modo corretto fatta eccezione al caso di problematiche di carattere pratico, ovvero flessibilità delle pareti e problemi legati alla corsa disponibile degli attuatori, che introducono imprecisioni sui dati necessari al funzionamento dei codici; e del caso di problematiche di carattere aerodinamico, ovvero separazione del modello riscontrata a 25° . Inoltre è possibile anche un'altra considerazione riguardante la corsa dei supporti e dei potenziometri. Ovvero, si è riscontrato che nel caso si intenda effettuare delle prove aerodinamiche di carattere tridimensionale è indispensabile aumentare in qualche modo la corsa disponibile, ad esempio per i potenziometri allentando le viti che li legano agli ingranaggi e ad ogni nuova configurazione riportare il valore di uscita a zero, mentre i supporti degli attuatori non lasciano molto margine. Quindi se si vuole sfruttare questa tecnologia in gallerie di grandi dimensioni è necessario aumentare, in proporzione, la corsa disponibile.

Occorre anche aumentare la rigidità delle pareti agli estremi della camera di prova. Infine un possibile aggiustamento lo si potrebbe fare introducendo

30CAPITOLO 3. *IL PROCEDIMENTO D'INDAGINE E L'ESECUZIONE DELLA PROVA*

un'elettronica di controllo automatico, interfacciando i motori, magari di tipo passo passo, direttamente ad un calcolatore per permettere un'acquisizione più veloce e una rielaborazione in tempo reale.

Appendice A

I codici utilizzati

A.1 I Codici accessori

```
1 function [theta]=theta_compute(h,x)
2 % [theta]=theta_compute(h,x_control,x_dublet) dato un sistema ortogonale di
3 % assi e dati x1 e x2 le basi di un triangolo di altezza h, la funzione
4 % calcola l'angolo formato tra la congiungente dei punti (x1,0) (x2,h) e
5 % l'ascissa
6 if ((h<0)||(h>0))
7     if (x>0)
8         theta=atan(h/x);
9     elseif (x<0)
10        theta=pi-atan(abs(h/x));
11    else
12        theta=pi/2;
13    end
14 else
15    error('h deve essere diversa da 0')
16 end
17 end
```

A.2 Calcolo linee di corrente del cilindro: Streamlinecylinder

```
function [v,v_ind,delta,p,y_fin,a,psi]=streamline_cylinder(U,x_cil,y_cil,mu,x,y,N)
2 % Funzione che calcola campo di moto e pressione ad una distanza y
3 % assegnata, note coordinate della doppietta coordinate dei punti di
4 % controllo e velocita' flusso uniforme
5
6 a=sqrt(mu/(2*pi*U)); % raggio cilindro
7 for(i=1:N)
8
9     theta(i)=theta_compute(y(i),x(i));
10
11    r(i)=x(i)/cos(theta(i)); % calcolo distanza pannello doppietta
12
13    ur(i)=U*(1-(a^2/r(i)^2))*cos(theta(i)); % Componente radiale velocita' totale
14    utheta(i)=-U*(1+(a^2/r(i)^2))*sin(theta(i)); % componente perpendicolare a ur
15
16    v(i)=sqrt(ur(i)^2+utheta(i)^2); % velocita' attorno al cilindro alla distanza r
17
18    p(i)=0.5*1.225*v(i)^2; % pressione dinamica sulla linea di corrente
19
20    psi(i)=sin(theta(i))*(mu/(2*pi*r(i))-U*r(i)); % calcolo funzione linea di corrente
21    y_fin(i)=psi(i); % calcolo posizione finale parete
22    delta(i)=y(i)-y_fin(i); % calcolo spostamento
```

```

end
24 v_ind=v-U; %calcolo velocita' indotta
26
28 end

```

A.3 Il calcolo delle configurazioni delle pareti

```

function [v,v_ind,delta,sigma,x_coll]=position(p,x,U)
2 % [delta]=position(p,y) note pressioni lungo la parete e posizione delle
% sorgenti calcola lo spostamento della parete
4 N=length(x);
6 for(i=1:N) % calcolo velocita' locali in corrispondenza delle prese di pressione
v(i)=sqrt(2*p(i)/1.225);
end
8 v_ind=v-U; % velocita' indotta incorrispondenza delle prese di pressione
x_coll(1)=x(1)-(x(2)-x(1))/2; %imposizione sorgente a monte della prima presa di pressione
10 x_coll(N+1)=x(N)+(x(N)-x(N-1))/2; %imposizione sorgente a valle dell'ultima presa di pressione

12 for(i=2:N) %calcolo punti di collocazione
x_coll(i)=x(i)-(x(i)-x(i-1))/2;
14 end

16 for(i=1:N) % calcolo coefficienti della matrice risolutiva del problema dell'intensita' delle sorgenti
for(j=1:N)
18 A(i,j)=1/(x(i)-x_coll(j));
20
end
22 end

24 for(i=1:N) %calcolo coefficienti di A relativi all'ultima sorgente
26 A(i,N+1)=1/(x(i)-x_coll(N+1));
28 end

```

Bibliografia

- [1] H. W. M. Hoeijmakers A. Elsenaar. «An experimental study of the flow over a sharp-edge delta wing subsonic and transonic speed». In: *A.G.A.R.D. CP-494* (1991).
- [2] D. Mistretta A. Miglietta. «Una camera di prova a pareti autoadattabili». Tesi di laurea mag. Politecnico di Milano, 2002-2003.
- [3] F. Auteri L. Quartapelle. *Fluidodinamica incompressibile*. A cura di Casa Editrice Ambrosiana. 2013.
- [4] A. Pope. *Wind-Tunnel testing*. 1954.