



POLITECNICO
MILANO 1863

SCUOLA DI INGEGNERIA INDUSTRIALE
E DELL'INFORMAZIONE

LAB 1

FLUIDODINAMICA SPERIMENTALE

Giovanni Orazi, 247368

Luca Piomboni, 242588

Anno accademico:
2024-2025

Abstract: Questo report presenta i risultati di un esperimento condotto in galleria del vento, volto alla caratterizzazione aerodinamica del profilo alare NACA 0015. L'attività si è articolata in tre fasi principali: la taratura di una bilancia di forza a tre componenti, la calibrazione della galleria del vento utilizzando due prese di pressione, e la misurazione delle forze aerodinamiche sul profilo alare.

Indice

1	Introduzione	4
2	Set up dell'esperimento	4
2.1	Cella bi-assiale	4
2.2	Modulo di input analogico NI9237	5
2.3	Sensore di coppia a reazione TSS400 FSH04365	5
2.4	Profilo NACA 0015	6
2.5	Galleria del vento	6
3	Errori di misurazione e propagazione	6
3.1	Errore assoluto e relativo	7
3.2	Propagazione dell'errore	7
3.2.1	Concetti Chiave sulla Propagazione	7
3.3	Fonti Specifiche di Errore	7
3.4	Strategie di Mitigazione	7
4	Calibratura della bilancia di forza	7
4.1	Matrice di sensibilità	9
5	Calibratura della galleria del vento	9
6	Misurazione delle forze agenti sul profilo	11
7	Conclusioni	14

Elenco delle figure

1	Setup della cella bi-assiale utilizzata nel test.	5
2	Datasheet del sensore MB400 QSH01643.	5
3	Modulo di input analogico NI9237.	5
4	Modulo di input utilizzato durante i test.	5
5	Sensore di coppia a reazione TSS400 FSH04365.	6
6	Datasheet del sensore TSS400 FSH04365.	6
7	Profilo NACA 0015.	6
8	Settaggio asse di applicazione della forza nel test di caratterizzazione della bilancia multi-componente.	8
9	Set-up tubi di pitot in galleria.	10
10	Risultati calcolati utilizzando K_1 . La figura in alto a sinistra rappresenta il C_L , la figura in alto a destra rappresenta il C_D , la figura in basso rappresenta il C_m	13

1. Introduzione

L' esperimento svolto attraverso questo laboratorio ha avuto come obiettivo lo studio e la caratterizzazione di un sistema di misura in una galleria del vento, finalizzato all' analisi dei carichi agenti su un profilo alare NACA 0015. L' attività è stata suddivisa in tre fasi principali:

- Taratura di una bilancia di forza a tre componenti
- Taratura della galleria del vento attraverso misure di pressione
- Misurazione delle forze aerodinamiche sul profilo

Nella prima fase è stata eseguita la taratura di una bilancia di forza in grado di misurare due componenti di forza verticali ed un momento. La calibrazione della bilancia è essenziale per garantire una misurazione accurata delle forze agenti durante il test sul profilo alare. I dati raccolti sono stati utilizzati per costruire una matrice di calibrazione associata alla cella di carico, necessaria per la corretta interpretazione dei segnali provenienti dai sensori.

Successivamente, è stata effettuata la taratura della galleria del vento utilizzando due prese di pressione statiche, al fine di determinare la distribuzione e il gradiente di pressione all' interno della sezione di prova. Questo passaggio è cruciale per garantire la corretta caratterizzazione del flusso d' aria e la sua uniformità, riducendo le incertezze legate alle misurazioni aerodinamiche.

Infine, è stato condotto un test sul profilo NACA 0015 per studiare l' andamento delle forze aerodinamiche al variare dell' angolo di attacco. Utilizzando i dati raccolti dalla bilancia precedentemente tarata e dalla galleria calibrata, sono state determinate le curve caratteristiche del profilo, come i coefficienti di portanza e resistenza.

L' obiettivo del report è quindi l' analisi dei dati ottenuti durante l' esperimento, per una completa caratterizzazione della cella di carico tramite la sua matrice associata, la valutazione dei dati provenienti dalle prese di pressione della galleria e la determinazione delle forze aerodinamiche agenti sul profilo. Questo permetterà di valutare le prestazioni aerodinamiche del profilo NACA 0015 e di validare la corretta calibrazione della strumentazione utilizzata.

2. Set up dell'esperimento

Il set-up dell'esperimento prevede l' utilizzo dei diversi strumenti di misurazione elencati di seguito:

- Cella di carico a 3 componenti per la misurazione delle forze e momenti, composta da una cella bi-assiale ed un torsionmetro.
- Modulo di input analogico
- Modello ala con profilo NACA 0015
- Galleria del vento
- Altri strumenti di misura (inclinometro, metro, livella, masse test, tubi di pitot, ...)

In questa sezione andremo ad analizzare ciascuno degli strumenti appena citati, vedendo in dettaglio il loro funzionamento e le loro caratteristiche tecniche che dovranno essere tenute in considerazione nell' analisi agli errori ed incertezze.

2.1. Cella bi-assiale

Una cella di carico bi-assiale è un dispositivo di misura progettato per rilevare forze applicate in due direzioni perpendicolari, tipicamente lungo gli assi X e Y.

Il funzionamento di una cella di carico bi-assiale si basa su un sistema di elementi sensibili disposti in modo da formare un ponte di Wheastone che, quando sottoposti a carico, si deformano cambiando la loro resistenza elettrica.

Questa variazione è proporzionale alla forza applicata e può essere misurata e convertita in un segnale elettrico utilizzabile. Le celle bi-assiali sono in grado di misurare simultaneamente le forze lungo i due assi, permettendo un' analisi più completa delle forze agenti.

In Figura [1] è possibile osservare la componente di misura bi-assiale della bilancia utilizzata.



Figura 1: Setup della cella bi-assiale utilizzata nel test.

SPECIFICATIONS	
PERFORMANCE	
Nonlinearity	$\pm 0.1\%$ of RO
ELECTRICAL	
Rated Output (RO)	2 mV/V nom (50 lb) 3 mV/V nom (200 lb)
Excitation (VDC or VAC)	18 max
Bridge Resistance	350 Ohm
Insulation Resistance	≥ 500 MOhm @ 50 VDC
Connection	4 Pin LEMO receptacle EGG.0B.304.CLL
Connector Code	CC4
MECHANICAL	
Weight (approximate)	16 oz (454 g)
Safe Overload	150% of RO
Material	Stainless-steel
IP Rating	IP50
TEMPERATURE	
Operating Temperature	-60 to 200°F (-51 to 93°C)
Compensated Temperature	60 to 160°F (15 to 72°C)
Temperature Shift Zero	$\pm 0.025\%$ of RO/°F (0.045% of RO/°C)
Temperature Shift Span	$\pm 0.01\%$ of Load/°F (0.018% of Load/°C)
CALIBRATION	
Calibration Test Excitation	10 VDC
Calibration (standard)	5-pt Tension
Calibration (available)	Compression
Shunt Calibration Value	60.4 kOhm (50 lb) 43.575 kOhm (200 lb)

Figura 2: Datasheet del sensore MB400 QSH01643.

2.2. Modulo di input analogico NI9237

Il segnale prodotto dai trasduttori è manipolato attraverso il modulo di input analogico NI9237 Strain/Bridge Serie C a 4 canali. Esso include il condizionamento del segnale necessario per alimentare e misurare simultaneamente fino a quattro sensori a quarto di ponte. Il modulo fornisce misure di carico o di sforzo con ritardo di fase nullo fra i canali. Nel set-up sono presenti due moduli NI9237, uno collegato alle misure di forza e uno collegato alle misure di pressione.

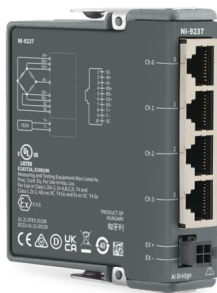


Figura 3: Modulo di input analogico NI9237.

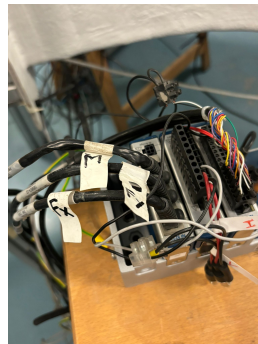


Figura 4: Modulo di input utilizzato durante i test.

2.3. Sensore di coppia a reazione TSS400 FSH04365

Il sensore di coppia a reazione TSS400 FSH04365 utilizzato è uno strumento dotato di un estensimetro per misurare la deformazione di un materiale quando è sottoposto a forze o carichi, in grado di misurare la coppia applicata attorno al suo asse. L'estensimetro funziona sulla base del principio per il quale la resistenza elettrica di un conduttore cambia proporzionalmente alla deformazione subita dal materiale. Il sensore utilizzato nell'esperimento è caratterizzato da una capacità di 22 [N/m]. In Figura [6] è allegato il datasheet del sensore.



Figura 5: Sensore di coppia a reazione TSS400 FSH04365.

SPECIFICATIONS	
PERFORMANCE	
Nonlinearity	±0.2% of RO
Hysteresis	±0.2% of RO
Nonrepeatability	±0.05% of RO
ELECTRICAL	
Rated Output (RO)	1 mV/V nom (5 in-oz) 2 mV/V nom (10 in-oz to 500 in-lb)
Excitation (VDC or VAC)	18 max
Bridge Resistance	350 Ohm nom (5 to 1000 in-oz) 700 Ohm nom (100 to 500 in-lb)
Connection	4 Pin LEMO® Receptacle (EGG.08.304.CLL)
Wiring Code	CC4
MECHANICAL	
Weight (approximate)	9 oz (250 g)
Safe Overload	300% of RO (5 to 400 in-oz) 150% of RO (1000 in-oz to 500 in-lb)
Material	Aluminum
IP Rating	IP40
TEMPERATURE	
Operating Temperature	-60 to 200°F (-50 to 93°C)
Compensated Temperature	60 to 160°F (15 to 72°C)
Temperature Shift Zero	±0.002% of RO/°F (0.0036% of RO/°C)
Temperature Shift Span	±0.002% of Load/°F (0.0036% of Load/°C)
CALIBRATION	
Calibration Test Excitation	10 VDC
Calibration (standard)	5-pt CW
Calibration (available)	5-pt CW & CCW
Shunt Calibration Value	60.4 kOhm (10 to 1000 in-oz) 100 kOhm (5 in-oz, 100 to 500 in-lb)

Figura 6: Datasheet del sensore TSS400 FSH04365.

2.4. Profilo NACA 0015

L'obiettivo dell'esperimento è la caratterizzazione dei coefficienti C_L , C_D e C_M del profilo NACA 0015 a velocità costante e ad angolo d'attacco α variabile. Il modello utilizzato in galleria presenta una corda $c = 100$ mm, e una apertura $b = 294$ mm. Il modello inoltre presenta alle estremità delle paratie per ridurre il più possibile gli effetti aerodinamici tridimensionali.

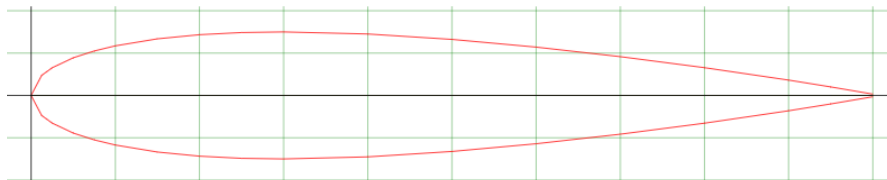


Figura 7: Profilo NACA 0015.

2.5. Galleria del vento

La galleria del vento utilizzata è una galleria a circuito chiuso e presenta una camera di prova di dimensioni $(1000 \times 300 \times 450)$ mm. La velocità massima ottenibile in galleria è di 37 m/s.

3. Errori di misurazione e propagazione

Gli errori di misurazione sono inevitabili nelle configurazioni sperimentali e possono essere categorizzati in **errori sistematici** e **casuali**. Gli errori sistematici derivano da bias nel sistema di misurazione, come sensori mal calibrati o problemi persistenti di allineamento. Gli errori casuali, invece, sono causati da fluttuazioni nelle condizioni di misurazione, come rumore ambientale o variazioni minori nel flusso della galleria del vento.

In questo esperimento, gli errori sistematici possono includere la miscalibrazione dei bilanci di forza e coppia, così come le imprecisioni nelle letture della pressione dovute all'allineamento delle prese di pressione statica o

al posizionamento del tubo di Pitot. Gli errori casuali derivano probabilmente da fluttuazioni nel flusso d'aria della galleria del vento o da rumore elettrico negli strumenti di misurazione.

3.1. Errore assoluto e relativo

L'errore assoluto è definito come la differenza tra **valore misurato** e **valore esatto** ed è un valore con segno, che si esprime nell'unità di misura della grandezza esaminata. L'errore relativo, invece, esprime la deviazione dal valore reale come sua percentuale.

3.2. Propagazione dell'errore

La propagazione degli errori rappresenta un aspetto fondamentale nella valutazione dell'incertezza complessiva delle misurazioni sperimentali. Ogni misura eseguita con strumenti ha un grado di incertezza, e tali incertezze si combinano e si propagano nei calcoli per derivare grandezze come i coefficienti aerodinamici e il coefficiente di perdita della galleria del vento.

Nonostante nel nostro esperimento non sia stata condotta un'analisi formale della propagazione degli errori, è importante sottolineare alcuni aspetti teorici e pratici legati a questa problematica.

3.2.1. Concetti Chiave sulla Propagazione

Quando una quantità derivata, come il coefficiente di portanza C_L , dipende da più variabili misurate (F_L , v , A , ρ), l'incertezza complessiva è influenzata dalle incertezze associate a ciascuna di queste variabili. In generale, gli errori si propagano attraverso le formule utilizzate, e l'impatto di ciascun errore dipende dalla sensibilità della grandezza derivata rispetto alle variabili coinvolte.

Per esempio, il coefficiente di portanza è definito come:

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2}\rho v^2 A},$$

e le incertezze in F_L , v , e ρ influenzano direttamente la precisione del risultato.

3.3. Fonti Specifiche di Errore

Senza un'analisi formale, possiamo comunque riflettere qualitativamente sulle fonti principali di incertezza nel nostro esperimento:

- **Calibrazione dei Bilanci di Forza e Coppia:** Errori sistematici potenziali nei coefficienti di calibrazione si traducono in errori proporzionali nelle misurazioni di forza e momento.
- **Misurazione della Pressione:** Imprecisioni nelle prese di pressione statica e nel tubo di Pitot introducono incertezze nei calcoli della velocità e del calo di pressione, influenzando il coefficiente di perdita della galleria del vento.
- **Densità dell'aria:** La dipendenza di ρ da temperatura, pressione e umidità introduce un'incertezza aggiuntiva se queste grandezze non sono monitorate con precisione.
- **Misurazioni sull'ala:** Il flusso non uniforme nella sezione di prova e il disallineamento dell'ala possono alterare le misurazioni di portanza, resistenza e momento.

3.4. Strategie di Mitigazione

Per minimizzare gli errori, i bilanci sono stati calibrati prima dell'esperimento e sono state effettuate misurazioni multiple per ogni condizione, riducendo le fluttuazioni casuali. Inoltre, sono state applicate correzioni per bias noti, come gli effetti di blocco della galleria del vento, ove appropriato. Nonostante questo sono state riportate nel report alcune problematiche ed errori sistematici che non sono stati possibili evitare.

4. Calibratura della bilancia di forza

Il primo step di questo laboratorio è stato effettuare la calibrazione della bilancia di forza. In Figura [8] è possibile vedere il set-up del test durante la fase di posizionamento dell'asse di applicazione della forza all'angolo desiderato.



Figura 8: Settaggio asse di applicazione della forza nel test di caratterizzazione della bilancia multi-componente.

Nelle Tabelle [2][4] sono riportati i dati ottenuti dalle misure sperimentali effettuate dal gruppo uno e due che ha effettuato i test. Il lavoro in laboratorio è stato diviso cercando di ottenere le misure di utilizzare il primo gruppo per avere misure sulle singole componenti di forza disaccoppiate e momento, mentre il secondo gruppo ha concentrato il focus nello studio degli accoppiamenti, in modo tale da ottenere indicazioni sull'effettiva indipendenza nella misurazione delle forze rispetto ai diversi assi.

F_x (N)	F_y (N)	M (Nm)
0	4.91	0
0	9.81	0
0	14.7	0
0	9.81	0
0	4.91	0
0	0	0
0	4.91	0.956
0	4.91	-0.956
0	4.91	-0.956
0	4.91	-0.491
0	0	0
0	0	0
4.91	0	0
9.81	0	0
14.7	0	0
9.81	0	0
4.91	0	0
0	0	0

Tabella 1: Carichi effettivi applicati dal gruppo 1.

F_x (V/V)	F_y (V/V)	M (V/V)
-1.508258E-6	1.623280E-4	8.290061E-8
-3.176343E-6	3.243469E-4	1.800587E-7
-4.762853E-6	4.870013E-4	6.848595E-7
-3.184967E-6	3.248486E-4	9.884656E-7
-1.679645E-6	1.626150E-4	2.938865E-7
-2.087872E-7	4.033875E-7	-3.064088E-8
2.924743E-6	1.632754E-4	8.633383E-5
-6.342135E-6	1.624517E-4	-8.709080E-5
-6.468879E-6	1.624818E-4	-8.709237E-5
-4.418017E-6	1.631600E-4	-4.462942E-5
-2.064502E-8	-8.943300E-8	5.346724E-8
-1.824548E-8	-7.927341E-8	-5.405460E-9
1.606221E-4	3.331400E-6	7.283477E-7
3.211338E-4	6.768182E-6	1.574837E-6
4.813449E-4	9.996782E-6	2.400170E-6
3.215463E-4	6.715900E-6	1.883670E-6
1.610885E-4	3.312574E-6	7.145075E-7
3.833130E-7	-1.459368E-7	-4.809458E-8

Tabella 2: Valori misurati gruppo 1.

F_x (N)	F_y (N)	M (Nm)
0	0	0
3.47	3.47	0.676
0	0	0
0	0	0
0	4.91	0
0	0	0
0	9.81	0
0	0	0
4.91	0	0
4.91	0	0
0	0	0
3.47	3.47	0.347

Tabella 3: Carichi effettivi applicati dal gruppo 2.

F_x (V/V)	F_y (V/V)	M (V/V)
-7.406990E-8	6.144941E-8	1.122535E-8
1.115191E-4	1.218131E-4	-8.569645E-5
-2.615026E-6	-2.793228E-6	2.074880E-6
-1.227776E-4	4.716439E-5	1.210906E-5
-1.458693E-6	1.628039E-4	5.924926E-7
1.542862E-8	3.941610E-8	-7.967462E-8
-3.057213E-6	3.256555E-4	-8.034039E-7
1.738796E-4	-1.694709E-4	1.174921E-5
1.658845E-4	-8.874019E-7	8.669680E-5
1.651712E-4	1.023504E-6	4.532704E-5
6.145068E-7	-2.121172E-7	-6.798118E-8
1.123400E-4	1.206673E-4	-4.581902E-5

Tabella 4: Valori misurati gruppo 2.

Le misurazioni sono state fatte cercando di concentrarci su misure in serie sullo stesso asse di forza, variando il peso o il braccio e controllando ad inizio e fine il valore dello zero per avere un'indicazione dell'effettivo mantenimento della taratura e non aver subito deformazioni o cambiamenti dello zero una volta effettuata la misurazione. Si può dunque notare tra la misurazione 6 del gruppo 1 e la 11, come il valore dello zero ha subito variazioni che rientrano all'interno del range di errore e per questo possiamo assumere che le precedenti misure non sono state affette da variazioni di settaggio dello zero. La stessa osservazione può essere ripetuta per tutte le misurazioni, notando una discrepanza nelle misurazioni del gruppo 2 per lo zero nella misurazione dello zero per le misurazioni 2 e 3 in cui notiamo diversi ordini di grandezza di differenza.

4.1. Matrice di sensibilità

I dati sperimentali ottenuti, come riportato anche nelle tabelle, sono espressi in Volt su Volt, dunque per caratterizzare la bilancia è stato fatto un calcolo ai minimi quadrati per ottenere la matrice di stabilità. Le matrici sono state dapprima valutate per i due gruppi separatamente: Matrici [1], [2] e successivamente mettendo insieme entrambe le misurazioni per avere un risultato ancora più preciso [3].

matrice stabilità gruppo 1

$$K_1 = 10^{-4} \begin{bmatrix} 0.3274 & 0.0068 & 0.0017 \\ -0.0033 & 0.3312 & 0.0003 \\ 0.0498 & 0.0013 & 0.9089 \end{bmatrix} \quad (1)$$

matrice stabilità gruppo 2

$$K_2 = 10^{-4} \begin{bmatrix} 0.3371 & 0.0007 & 0.1282 \\ -0.0032 & 0.3322 & -0.0030 \\ -0.0502 & 0.0749 & 1.4477 \end{bmatrix} \quad (2)$$

matrice stabilità totale

$$K_{tot} = 10^{-4} \begin{bmatrix} 0.3286 & 0.0066 & 0.0138 \\ -0.0032 & 0.3315 & -0.00002 \\ 0.0399 & -0.0131 & 0.9236 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Dai risultati è possibile notare alcuni aspetti. Anzitutto, dato che la misura di forze e momenti deve essere disaccoppiata le varie matrici di sensibilità dovrebbero essere diagonali e in effetti i termini fuori dalla diagonale sembrano avere circa due ordini di grandezza di differenza. Inoltre ci aspettiamo che i risultati ottenuti dai due gruppi siano simili, considerando la presenza di eventuali errori. In effetti sia per la misura di forza verticale che orizzontale i risultati sono molto coerenti, mentre la misura di momento ha una differenza leggermente maggiore, ma comunque entro limiti ragionevoli.

Sulla base di questo è possibile assumere che i risultati ottenuti in galleria e post-processati sono coerenti con i valori attesi.

5. Calibratura della galleria del vento

Il secondo step è stato la taratura della galleria del vento, che risulta essere un processo fondamentale per garantire l'accuratezza dei dati raccolti durante i test di flusso. In questo contesto, abbiamo misurato le pressioni

statiche in punti specifici della galleria a differenti velocità del flusso, in particolare la pressione nel convergente P_1 e la pressione davanti alla camera di prova P_2 , come mostrato nello schema in Figura [9] attraverso delle pressure taps. Mentre in camera di prova è stato inserito un tubo di pitot che permetteva di ottenere una misura della pressione statica e totale (rispettivamente p_s e p_t) del flusso. Tali valori vengono ottenuti in unità di misura Volt, per questo sono stati dovuti convertire in Pascal attraverso la relazione:

$$P(Pa) = P(V) \cdot 200$$

e i risultati sono consultabili nelle Tabelle [5],[6].

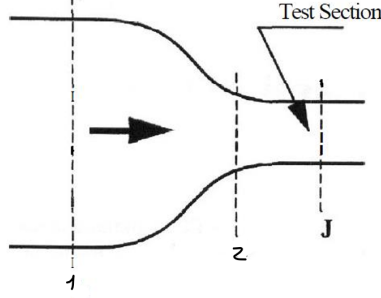


Figura 9: Set-up tubi di pitot in galleria.

Definendo quindi i concetti di pressione totale:

$$P_{totale} = P_{statica} + P_{dinamica}$$

dove la pressione dinamica è calcolata come

$$P_{dinamica} = q = \frac{1}{2}\rho v^2$$

con $\rho = 1.192 kg/m^3$ che rappresenta la densità dell'aria misurata al momento del test e v la velocità del flusso. Utilizzando l'equazione di Bernoulli, possiamo stabilire una relazione tra le pressioni e le velocità nei punti P_1 e P_2 :

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 = P_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2(1 - C_1)$$

Dove $\frac{1}{2}\rho v_2^2 C_1$ è la perdita di pressione totale tra i punti 1 e 2. In questa equazione, v_1 è la velocità nel convergente e v_2 è la velocità prima della camera di prova. Ora, definendo q_j come la pressione dinamica in camera di prova otteniamo possiamo scrivere che:

$$q_1 = \frac{\rho}{2}v_1^2 = \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2 \frac{\rho}{2}v_2^2 = C_2 q_2$$

$$q_2 = \frac{\rho}{2}v_2^2 = \left(\frac{A_j}{A_2}\right)^2 \frac{\rho}{2}v_j^2 = C_3 q_j$$

Quindi unendo le ultime tre equazioni presentate otteniamo:

$$P_1 - P_2 = (1 - C_1 - C_2)C_3 q_j \quad (4)$$

A questo punto, attraverso i dati sperimentali e la conoscenza della pressione dinamica in camera di prova è possibile ottenere i tre coefficienti e dunque il coefficiente di calibrazione della galleria del vento $C = (1 - C_1 - C_2)C_3$.

Di seguito dunque riportiamo i risultati sperimentali delle misure sulla pressione in galleria.

$P_s - P_2$ (V)	$P_t - P_2$ (V)	$P_1 - P_2$ (V)
-7.316044E-2	8.607181E-1	7.654127E-1
-9.079259E-2	1.061896E+0	9.412461E-1
-1.102611E-1	1.261122E+0	1.118743E+0
-1.401295E-1	1.582188E+0	1.405314E+0
-1.733209E-1	1.945096E+0	1.724837E+0
-2.043407E-1	2.270009E+0	2.011134E+0

Tabella 5: Dati di pressione misurati in galleria.

$P_s - P_2$ (Pa)	$P_t - P_2$ (Pa)	$P_1 - P_2$ (Pa)
-14.63	172.14	153.08
-18.16	212.38	188.25
-22.05	252.22	223.75
-28.03	316.44	281.06
-34.66	389.02	344.97
-40.87	454.00	402.23

Tabella 6: Conversione delle pressioni in Pascal.

Dalle prime due colonne della Tabella [6] è possibile ottenere il valore di q_j . In questo modo, avendo già $P_1 - P_2$, attraverso un semplice rapporto ci otteniamo il valore di $(1 - C_1 - C_2)C_3$ per ogni misurazione. Di seguito riportiamo tutti i valori ottenuti:

q_j	$(1 - C_1 - C_2)C_3$
186.7757	0.8196
230.5377	0.8166
274.2766	0.8158
344.4635	0.8159
423.6834	0.8142
494.8699	0.8128

Tabella 7: Risultati salto di pressione galleria.

A questo punto attraverso una regressione attraverso la funzione di minimizzazione dell'errore definita come $\sum (z_j - C_3 \cdot (1 - C_1 - C_2))^2$ otteniamo i tre coefficienti come:

- $C_1 = 0.3572$
- $C_2 = 0.1265$
- $C_3 = 1.5800$

Quindi il coefficiente di calibrazione totale della galleria risulta essere:

$$C_{tot} = (1 - C_1 - C_2)C_3 = 0.8158 \quad (5)$$

A valle di tutte queste misurazioni dovremmo fare delle considerazioni a riguardo del test effettuato: anzitutto il pitot in camera non è stato posizionato esattamente al suo centro, per fattori legati alle tempistiche a disposizione, infatti il tubo, sebbene scollegato dal sensore di misurazione, è stato lasciato all'interno della galleria del vento anche durante la fase successiva di misurazione delle forze agenti sul profilo. La sua posizione però è stata settata in modo tale da non andare a creare problemi di scia al profilo alare.

Infine conoscendo le due pressioni e il loro salto effettivo, potremmo valutare eventuali perdite di carico della galleria che dipendono principalmente da fenomeni di attrito e turbolenza, causando dissipazione di energia meccanica del flusso d'aria. Queste perdite sono influenzate da vari fattori, inclusi la geometria della galleria, le caratteristiche della superficie interna, la velocità dell'aria e la presenza di componenti come griglie, reti di uniformazione o ostacoli. Per fare ciò potremmo procedere direttamente andando a valutare il salto di pressione teorico tra i due punti e confrontarlo con i dati sperimentali ottenuti, oppure usare direttamente la formula per stimare la perdita di carico, conoscendo sia il coefficiente d'attrito globale che locale della galleria. La conoscenza dei dati sperimentali ovviamente ci permette di stimare questi due coefficienti caratterizzando completamente la galleria.

6. Misurazione delle forze agenti sul profilo

Di seguito sono riportate nelle rispettive tabelle (8) e (9) le misure di forza ottenute nel laboratorio con i rispettivi angoli di attacco associati. Per eliminare il contributo delle forze associate alla massa del modello, le misure sono state prese anche in assenza di vento in modo da poter togliere il suddetto contributo di massa alla misura totale delle forze agenti sul profilo. In questo modo è possibile isolare le forze aerodinamiche di cui siamo interessati.

α (°)	$\mathbf{F}_x$ (V/V)	$\mathbf{F}_y$ (V/V)	$\mathbf{M}$ (V/V)	$\mathbf{p}_1 - \mathbf{p}_2$ (V)
0 (wind on)	-7.767226E-6	-6.415569E-6	6.857122E-7	1.446706E+0
3 (wind off)	-1.917049E-5	-1.000988E-6	8.033055E-8	-1.024362E-4
3 (wind on)	-1.971413E-5	-1.362774E-4	8.678133E-6	1.435430E+0
6 (wind off)	-3.857044E-5	-3.066631E-6	-2.492534E-9	-1.369756E-4
6 (wind on)	-2.136296E-5	-2.496714E-4	1.579757E-5	1.427727E+0
9 (wind off)	-5.768945E-5	-6.197123E-6	3.601950E-8	-1.428853E-4
9 (wind on)	-2.107028E-5	-3.126003E-4	2.220410E-5	1.420156E+0
10 (wind off)	-6.418006E-5	-7.331625E-6	4.341660E-8	-1.288332E-4
10 (wind on)	-2.095893E-5	-3.305430E-4	2.409552E-5	1.421305E+0
11 (wind off)	-7.052833E-5	-8.822169E-6	1.367882E-7	3.847923E-5
11 (wind on)	-2.060576E-5	-3.482173E-4	2.581482E-5	1.425201E+0
12 (wind off)	-7.684531E-5	-1.033134E-5	1.472861E-7	4.596495E-6
12 (wind on)	-8.587243E-5	-2.466805E-4	1.170710E-5	1.415502E+0
13 (wind off)	-8.341955E-5	-1.198639E-5	1.455866E-7	7.406924E-5
13 (wind on)	-9.903890E-5	-2.318886E-4	1.012521E-5	1.415176E+0
0 (wind off)	-1.301537E-7	-4.185345E-7	3.423955E-8	1.971240E-4

Tabella 8: Misura forze gruppo 1.

Come specificato nella sezione della taratura della galleria del vento, attraverso la misura della pressione possiamo calcolare la velocità nella camera di prova. la velocità media degli esperimenti è data da:

$$\bar{U} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)_i}{\rho C_{tot}}} = 24.2859 \text{ m/s} \quad (6)$$

dove la densità misurata è $\rho = 1.192 \text{ kg/m}^3$, C_{tot} è il coefficiente di taratura della galleria del vento ottenuto precedentement nella sezione della taratura della galleria del vento, e $p_i [\text{Pa}] = p_i [V] * 200 [\text{Pa}/V]$ sono le pressioni misurate in galleria espressa in Pascal. Di conseguenza è possibile calcolare il numero di Reynolds caratteristico del flusso studiato:

$$Re = \frac{\bar{U}c}{\nu} = 134697 \quad (7)$$

dove $\nu = 1.8E - 5$, e $c = 0.1 \text{ m}$. Le forze aerodinamiche sono isolate utillizzando le misure in assenza di vento per ogni angolo d'attacco indicate con F^{massa} .

$$F_x^{aero} = F_x^{tot} - F_x^{massa}, \quad F_y^{aero} = F_y^{tot} - F_y^{massa}, \quad M^{aero} = M^{tot} - M^{massa} \quad (8)$$

Queste misure si riferiscono agli assi corpo del profilo, quindi è necessario utilizzare un cambiamento di riferimento da assi corpo ad assi vento prima di poter calcolare i coefficienti aerodinamici. Indicheremo con (X, Y) il sistema di riferimento in assi vento e con (x, y) il sistema di riferimento in assi corpo. Naturalmente, il terzo asse coincide nei due sistemi di riferimento e non è quindi necessario modificare il momento misurato. Per operare il cambiamento di riferimento, procediamo nel seguente modo:

$$\begin{bmatrix} F_x^{aero} \\ F_y^{aero} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \\ -\sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_x^{aero} \\ F_y^{aero} \end{bmatrix} \quad (9)$$

In questo modo abbiamo ricavato le componenti della forza aerodinamica nel sistema di riferimento in assi vento. Da questa misura è possibile ottenere i coefficienti aerodinamici di cui siamo interessati. Questi sono quindi ottenuti considerando la seguente adimensionalizzazione:

$$C_D = \frac{F_x^{aero}}{\frac{1}{2}\rho U^2 cb} \quad (10)$$

$$C_L = \frac{F_y^{aero}}{\frac{1}{2}\rho U^2 cb} \quad (11)$$

$$C_M = \frac{M^{aero}}{\frac{1}{2}\rho U^2 c^2 b} \quad (12)$$

Di seguito presentiamo i risultati ottenuti considerando come riferimento le curve esatte per un profilo NACA0015 bidimensionale.

α ($^\circ$)	$\mathbf{F}_x$ (V/V)	$\mathbf{F}_y$ (V/V)	$\mathbf{M}$ (V/V)	$\mathbf{p}_1 - \mathbf{p}_2$ (V)
0 (wind on)	-7.423176E-6	-8.509085E-6	9.292769E-7	1.447482E+0
-13 (wind off)	8.368491E-5	-7.598174E-6	6.923043E-8	-7.301861E-5
-13 (wind on)	6.493702E-5	2.144442E-4	-1.010887E-5	1.429315E+0
-12 (wind off)	7.751752E-5	-6.113127E-6	1.565824E-7	-1.759801E-4
-12 (wind on)	1.215827E-4	3.444885E-4	-2.626838E-5	1.441349E+0
-11 (wind off)	7.145954E-5	-4.761168E-6	6.494303E-8	3.495963E-4
-11 (wind on)	1.097174E-4	3.323718E-4	-2.484424E-5	1.442469E+0
-10 (wind off)	6.512505E-5	-3.767109E-6	7.225367E-8	6.921008E-5
-10 (wind on)	9.671752E-5	3.159807E-4	-2.300625E-5	1.439877E+0
-9 (wind off)	5.884662E-5	-2.834895E-6	2.397722E-8	-8.024167E-5
-9 (wind on)	8.409173E-5	2.983993E-4	-2.114535E-5	1.443197E+0
-6 (wind off)	3.949802E-5	-7.036082E-7	-4.400694E-9	3.545868E-5
-6 (wind on)	4.761595E-5	2.351060E-4	-1.471134E-5	1.442300E+0
-3 (wind off)	2.009699E-5	5.039818E-7	-9.756064E-8	1.125485E-4
-3 (wind on)	1.475886E-5	1.080059E-4	-7.324231E-6	1.444984E+0
0 (wind off)	3.865561E-7	6.967129E-7	-1.491048E-8	8.011034E-5
0 (wind on)	-7.162138E-6	-7.376595E-6	7.815972E-7	1.437707E+0

Tabella 9: Misura forze gruppo 2.

Le curve teoriche dei coefficienti sono state ottenute utilizzando Xfoil e utilizzate per comparare i risultati ottenuti. I risultati in Figura [10] sono stati ottenuti utilizzando le misure di calibrazione del Gruppo 2, e di conseguenza utilizzando la matrice di calibrazione K_2 calcolata precedentemente. Gli andamenti dei coefficienti sono stati catturati adeguatamente negli esperimenti. L'obiettivo

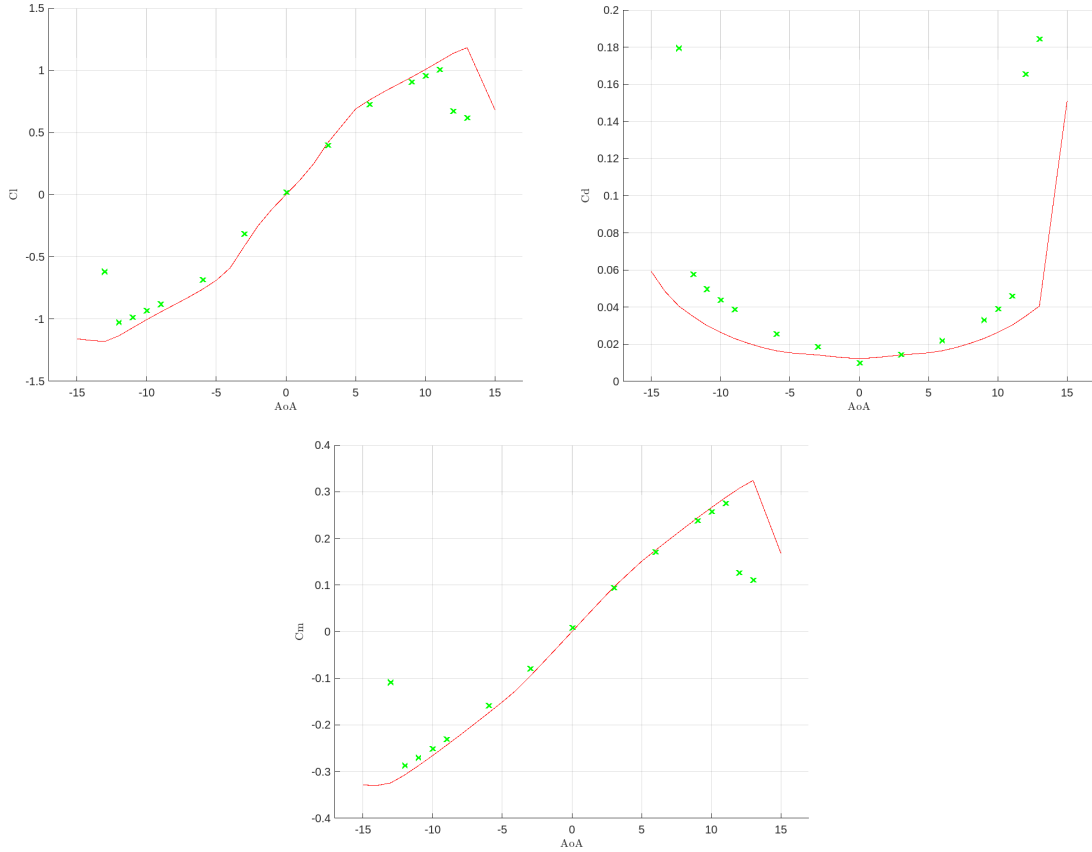


Figura 10: Risultati calcolati utilizzando K_1 . La figura in alto a sinistra rappresenta il C_L , la figura in alto a destra rappresenta il C_D , la figura in basso rappresenta il C_m .

7. Conclusioni

Per concludere, ricapitoliamo gli esperimenti condotti durante il laboratorio e i risultati ottenuti. del laboratorio è stato quello di caratterizzare le forze aerodinamiche agenti su un profilo NACA0015 a diversi angoli d'attacco e a velocità nominale fissata in galleria del vento. Per la misura delle forze è stato utilizzata una cella di carico bi-assiale, mentre per la misura del momento è stato utilizzato un sensore di coppia a reazione. Per prima cosa, la calibrazione dei sensori è stata condotta utilizzando carichi conosciuti in diverse configurazioni, ottenendo così la matrice di calibrazione che è stata utilizzata in seguito per ottenere le forze in Newton partendo dai segnali misurati in Volt su Volt.

In seguito, è stata condotta la calibrazione della galleria utilizzando i dati misurati da due prese statiche e un tubo di Pitot a diverse velocità, ottenendo così il coefficiente C_{tot} che lega le misure $p_1 - p_2$ alla pressione dinamica q_j in camera di prova. Successivamente, la caratterizzazione del profilo è stata portata avanti misurando le forze agenti sul profilo a diversi angoli di attacco.

I risultati ottenuti sono congrui con gli andamenti teorici attesi.