

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI GENOVA



SCUOLA POLITECNICA

*Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Energetica,
Gestionale e dei Trasporti
Corso di Laurea in Ingegneria Meccanica*

TESI DI LAUREA:

Misure di forze fluidodinamiche su un dispositivo di
Energy Harvesting

Relatore

Chiar.mo Prof.Ing. Alessandro Bottaro

Chiar.mo Prof.Dott. Corrado Boragno

Correlatore

Dott. Gregorio Boccalero

Candidato

Luca Travaglini

Indice

Introduzione	2
1 - Energy Harvesting	3
Tipologie Di Energy Harvester	4
2 - FLEHAP	8
Configurazione Meccanica	10
Modello meccanico e legge del Moto	13
Estrazione Energetica	15
3 - Apparato Sperimentale	17
Galleria del vento	17
Camera	19
Generatore di fumo	19
Cella di carico	20
Alimentatore DC	21
Illuminazione	21
Ambiente di calcolo	21
4 - Risultati Sperimentali	22
Scelta dei parametri	22
Setup sperimentale	24
Misure ed analisi dei dati	27
Conclusioni-Osservazioni	47
<i>Bibliografia</i>	49

Introduzione

"Tutto è energia e questo è tutto quello che esiste." (Albert Einstein)

Il rapido sviluppo delle tecnologie informatiche insieme a quelle elettroniche ha portato, negli ultimi decenni, ad un uso estensivo dei dispositivi di controllo, quali i sensori, nei più diversi campi di utilizzo. Questo veloce cambiamento ha radicalmente cambiato le regole dell'ingegneria classica, che prevedeva il raggiungimento di buona efficienza solo tramite la buona progettazione, spostando l'attenzione in buona parte anche sul controllo istantaneo. In un tale contesto non sorprende trovare le WSN (Wireless System Network), reti di sensori controllati a distanza in grado di rilevare parametri fisici distribuiti in un ambiente più o meno esteso. L'utilizzo di questa tecnologia porta però diverse problematiche, la cui prima è sicuramente l'alimentazione della rete. Per sopperire a questo problema si è inserito in tale contesto la micro generazione da fonte rinnovabile, ossia l'Energy Harvesting.

In questa tesi è stata affrontata la misura delle forze fluidodinamiche agenti su un dispositivo di Energy Harvesting, in grado di sfruttare l'energia del vento. Il suo acronimo è FLEHAP (Fluttering Energy Harvester for Autonomous Powering). Con particolare attenzione si vogliono delineare le relazioni tra vorticosità e sollecitazione indotta. Le prove sono state effettuate nei laboratori del DIFI in galleria del vento, con supporto di diverse attrezzature.

1 - Energy Harvesting

Con il termine Energy Harvesting (Energy Scavenging o Power Harvesting) si identifica il processo secondo il quale l'energia proveniente da fonti esterne (es: energia solare, termica, cinetica) viene catturata e accumulata, in piccole quantità (decine di mW), per l'alimentazione di dispositivi elettronici dalle ridotte richieste energetiche, come le reti di sensori o l'elettronica indossabile.

Mentre per la generazione di energia su larga scala si fa affidamento su combustibili fossili, che possiedono un determinato costo, gli Energy Harvester sono dispositivi in grado di raccogliere l'energia posseduta dalle fonti rinnovabili, come il vento o le onde del mare, a costo zero. Questo aspetto, unito al ridotto costo di produzione, li rende competitivi sul mercato nonostante la piccola potenza prodotta.

Un chiaro esempio di applicazione di Energy Harvesting si ha per le WSN (Wireless System Network). Si tratta di reti di sensori autonomi distribuiti in larga scala per controllare determinati parametri fisici. Alcune applicazioni sono il monitoraggio dell'inquinamento dell'aria o dell'acqua, la rilevazione di incendi nei boschi o il controllo dell'integrità strutturale di un edificio. L'Internet of Things (IoT) è un altro campo di applicazione di Energy Harvesting. Esso è un network di oggetti fisici (dispositivi, veicoli, costruzioni e altri oggetti integrati con elettronica, software, sensori, e connettività network) che permette a questi oggetti di collegarsi [1].

Per i dispositivi pocanzi citati risulta fondamentale lo studio dell'alimentazione energetica. Essa può avvenire attraverso il collegamento diretto alla rete elettrica o, qualora non fosse possibile a causa della lontananza dalla stessa, attraverso l'utilizzo di batterie o di Energy Harvester. Tuttavia l'uso di batterie può causare delle complicanze: in primo luogo poiché necessita di manodopera continua per la sostituzione e, in secondo luogo, potrebbe comportare difficoltà pratiche causate dal difficile posizionamento (es. ponte, cima albero). Un generatore localizzato a basso costo,

quale è un Energy Harvester, può risolvere questi problemi, aumentando la stabilità e l'affidabilità del sistema. Infatti, una differenza chiave di questa energia da quella accumulata nelle batterie è che questa energia è potenzialmente infinita, anche se ci può essere un limite sul tasso con il quale può essere utilizzata [2].

Tipologie Di Energy Harvester

Nel mondo dell'Energy Harvesting si incontrano dispositivi di ogni sorta, in grado di sfruttare le più disparate fonti energetiche. Per poter esplorare un territorio così ampio si fa riferimento ad una classificazione, in base al principio di funzionamento. Abbiamo così Energy Harvester:

- Termoelettrici
- Elettromagnetici
- Meccanici

Termoelettrici

Consistono nella giunzione di due differenti materiali e nella presenza di un gradiente termico. Sfruttano l'effetto Seebeck, secondo il quale due materiali metallici posti in contatto a diversa temperatura, sviluppano una differenza di potenziale. Ottenendo circa $100\text{-}200\mu\text{V/K}$ per giunzione, sono raggiungibili risultati apprezzabili, connettendo in serie le giunzioni elettriche e mantenendo in parallelo quelle termiche. Tra le applicazioni più interessanti troviamo quella su corpo umano. Infatti, tra le altre tipologie di Energy Harvesting, quella

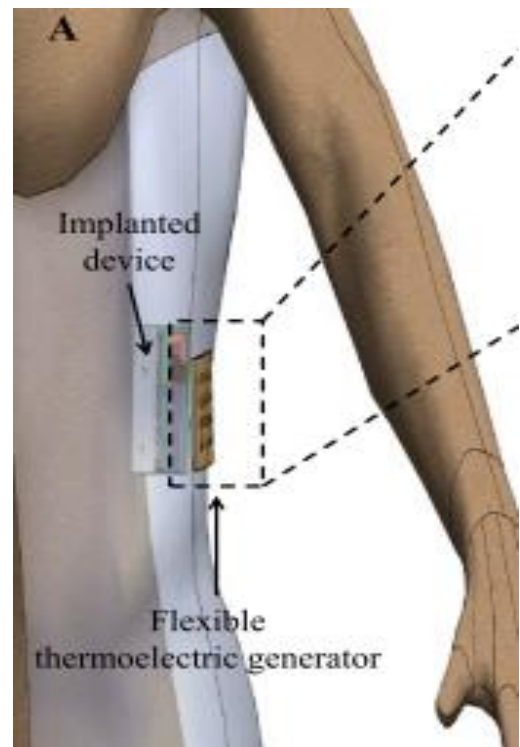


Figura 1.1 – Energy Harvesting termoelettrico su corpo umano attuato grazie ad una speciale termica che sfrutta l'effetto Seebeck.

termoelettrica sul corpo umano ha diversi vantaggi poiché il flusso termico è costante e grande [3]. Nella figura 1.1 si può apprezzare l'utilizzo di una particolare maglia termica in grado di cogliere il gradiente termico a contatto con la pelle.

Elettromagnetici

Consistono nella conversione dell'energia da onde elettromagnetiche. Il fotovoltaico è il metodo più diffuso e sperimentato e consiste nel convertire la radiazione solare in corrente elettrica grazie a semiconduttori, che esibiscono il cosiddetto effetto "fotovoltaico". Esistono inoltre speciali antenne in grado di assorbire energia dalle onde radio vaganti. Questo può essere ottenuto anche grazie alla Rectenna (Rectifying Antenna), uno speciale tipo di antenna usato per convertire energia elettromagnetica in corrente continua e, teoricamente, a frequenze anche più alte, dalla Nantenna (Nano Antenna). Un'idea è quella di trasmettere volontariamente energia RF per alimentare piccoli dispositivi a distanza, come ormai accade nei sistemi di identificazione passivi in radio-frequenza (RFID).

Meccanici

Consistono nella conversione convenzionale di energia da meccanica a elettrica, sfruttando il moto di una massa o la deformazione della stessa, sotto l'azione di forze. Tra tutti i dispositivi di Energy Harvesting, quelli meccanici sono certamente i più utilizzati e i più studiati, poiché possono prevedere infinite configurazioni.

Attualmente possiamo dividere questi dispositivi in due grosse classi, in base al principio di estrazione energetica:

- Piezoelettrici
- Accoppiamento Elettromagnetico (EMC: ElectroMagneticCoupling)

I primi sfruttano il cosiddetto "effetto piezoelettrico", presentato da alcuni materiali, il quale converte una deformazione meccanica in corrente elettrica o in una differenza di potenziale. La deformazione può essere causata da diverse fonti: il movimento di uomini, oscillazioni sismiche a bassa frequenza e rumori acustici sono esempi di tutti i

giorni. Per essere efficiente, un sistema piezoelettrico deve operare in corrente alternata (AC) e questo lo porta ad aver bisogno di sollecitazioni variabili nel tempo ad elevata frequenza. Tra gli altri dispositivi di Energy Harvesting Meccanici, la trasduzione piezoelettrica ha ricevuto la più grande attenzione. Questo poiché i materiali piezoelettrici hanno la più grande densità di potenza e la più elevata fattibilità per applicazioni pratiche rispetto a gli altri materiali utilizzati [4]. Oggigiorno esistono applicazioni stradali in grado di raccogliere l'energia dal passaggio delle automobili o, addirittura, dal movimento dello zaino sulle spalle di una persona (fig. 1.2). In Giappone esistono stazioni ferroviarie nelle quali l'energia necessaria per la movimentazione dei tornelli arriva proprio dal passaggio delle persone sulle banchine.

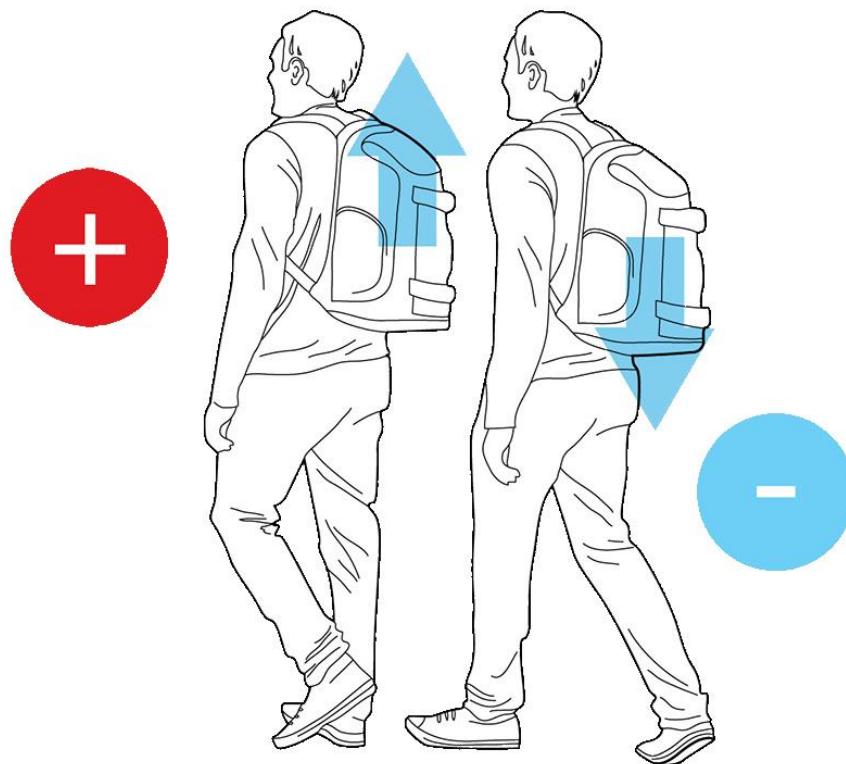


Figura 1.2 – Energy Harvesting applicato al corpo umano. In questo caso si estrae energia grazie a trasduttori piezoelettrici applicati su uno zaino ed eccitati dal moto oscillatorio verticale.

I secondi sfruttano l'energia cinetica di una massa e la legge di Faraday-Neumann-Lenz. In particolare si può sfruttare lo spostamento di un oggetto all'interno di un campo magnetico per ottenere una forza elettromotrice indotta che, nel caso di un

corpo conduttore, provoca una corrente elettrica. Maggiore è la velocità e maggiore è la derivata del campo magnetico nel tempo. Ogni oggetto in movimento, anche se infinitamente piccolo, può sfruttare questo principio, ed è quello che accade per i dispositivi EMC. Un particolare tipo di dispositivo meccanico, di cui si discuterà in questa tesi, è rappresentato dai VIV (VortexInducedVibration), ossia Energy Harvester che sfruttano l'interazione fluido-struttura.

2 – FLEHAP

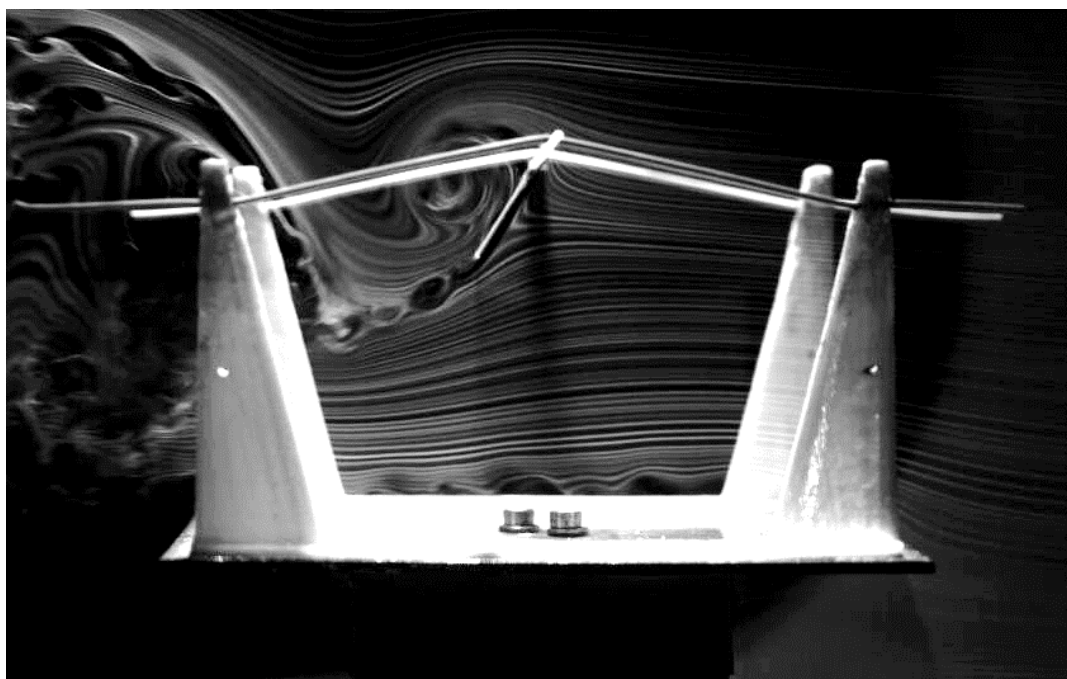


Figura 2.1 – Prototipo FLEHAP esclusivamente meccanico, privo di estrazione energetica.

FLEHAP (fig. 2.1) è l'acronimo di Fluttering Energy Harvester for Autonomous Power ed è un dispositivo di Energy Harvesting attualmente in fase di ricerca presso il dipartimento di Fisica (DIFI), in collaborazione con il Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica e Ambientale (DICCA) dell'Università degli Studi di Genova. Il sistema appartiene alla famiglia dei VIV (VortexInducedVibration), e sfrutta l'interazione fluido-struttura (in questa tesi aria, ma potrebbe essere anche acqua o un qualsiasi altro fluido) per la conversione in energia elettrica. Il fluido in moto uniforme trasferisce energia cinetica al sistema inducendo, con le giuste condizioni, oscillazioni e angoli di attacco anche di grande ampiezza. Le ridotte dimensioni (circa 50 cm²) rendono FLEHAP un competitore energetico delle micro-turbine eoliche. Infatti le macchine rotatorie sono altamente efficienti per grosse dimensioni e ad alti numeri di Reynolds, e le perdite viscosse diminuiscono fortemente l'efficienza aerodinamica quando sono scalate a dimensioni centimetriche [5]. Invece il design alternativo con ala oscillante e ruotante per estrarre energia, ispirato alla locomozione dei pesci e degli uccelli, elimina

i problemi delle turbine ed è meglio adatto a dispositivi di piccole dimensioni e per piccolo numeri di Reynolds[6-7].

Tra gli aspetti più interessanti del dispositivo citiamo innanzitutto il fatto che la sua frequenza di oscillazione vari in funzione della velocità del vento. Non solo, presenta inoltre un transitorio di frequenza e ampiezza rappresentato dall'apertura dell'otto nelle figure sottostanti (fig. 2.2 – tra la 5° e la 6° immagine), al quale associamo una brusca variazione delle traiettorie.

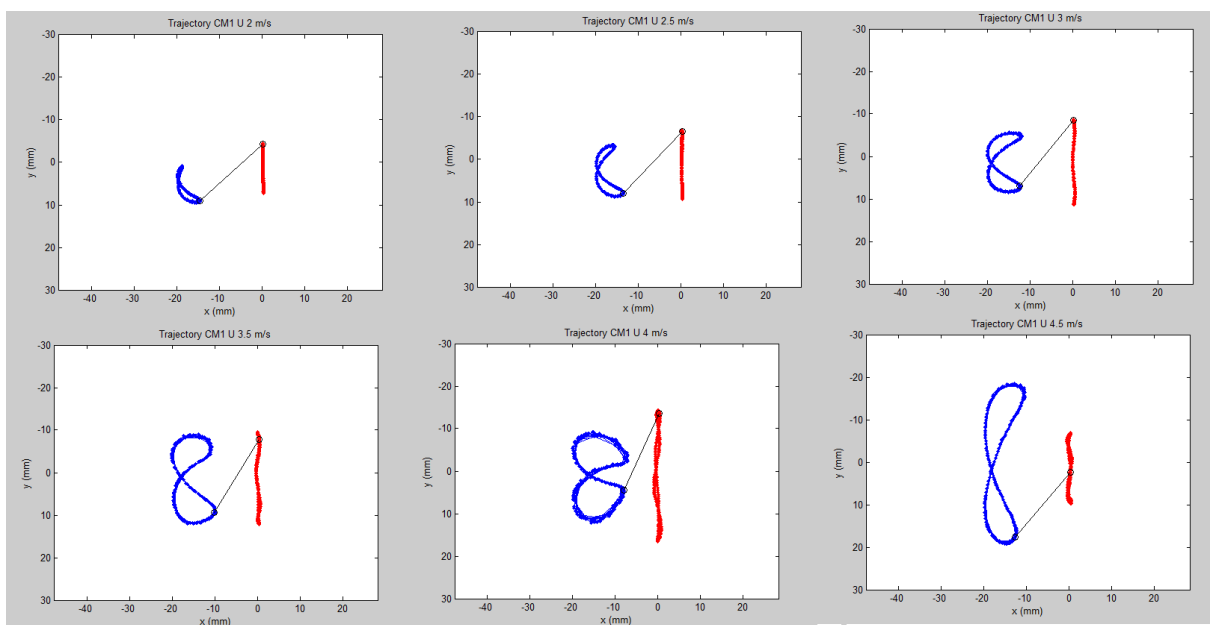


Figura 2.2 – Comportamento delle traiettorie descritte dall'ala di FLEHAP alle diverse velocità del vento.

Il transitorio rende singolare l'estrazione energetica poiché presenta un massimo locale in frequenza e ampiezza, termini al quale è legato fortemente l'EMC (Accoppiamento Elettromagnetico).

Studi precedenti [8] hanno dimostrato la possibilità di estrarre una potenza elettrica crescente con velocità del vento da 3mW fino a 17mW. Tali potenze consentono l'alimentazione autonoma di dispositivi elettronici come sensori o micro-processori (WSN e IoT) a velocità del vento molto basse (minori a 5 m/s) e rendono il dispositivo fino ad ora sviluppato un Energy Harvester già internazionalmente competitivo [9-10].

Configurazione Meccanica

La configurazione attuale del Flehap prevede un'ala collegata a due elastomeri nel loro punto medio, i quali sono a loro volta collegati a una struttura portante dotata di quattro braccia (una per ogni estremo degli elastomeri).

L'ala (foil), costituita da un sottile foglio di polivinilacetato ($\rho=1,17 \text{ g/cm}^3$) è assimilabile ad un airfoil per la teoria fluidodinamica, avente superficie superiore molto vicina alla superficie inferiore e molto vicine al chord. Su di essa definiamo i concetti di:

- *Leading Edge* (LE): punto frontale dell'ala, il primo ad entrare in contatto con la vena fluida.
- *Trailing Edge* (TL): punto finale dell'ala, l'ultimo ad entrare in contatto con la vena fluida.
- *Chord* (c): lunghezza dell'ala, intesa come distanza tra LE e LT.
- *Span* (S): larghezza dell'ala, uniforme tra LE e LT, quindi congruente alla distanza tra i due elastomeri nel loro punto medio.
- *Pivot point*: punto del chord in cui l'ala è attaccata agli elastomeri.
- Angolo di attacco (α): angolo che il chord intercetta con la linea di flusso di fluido.

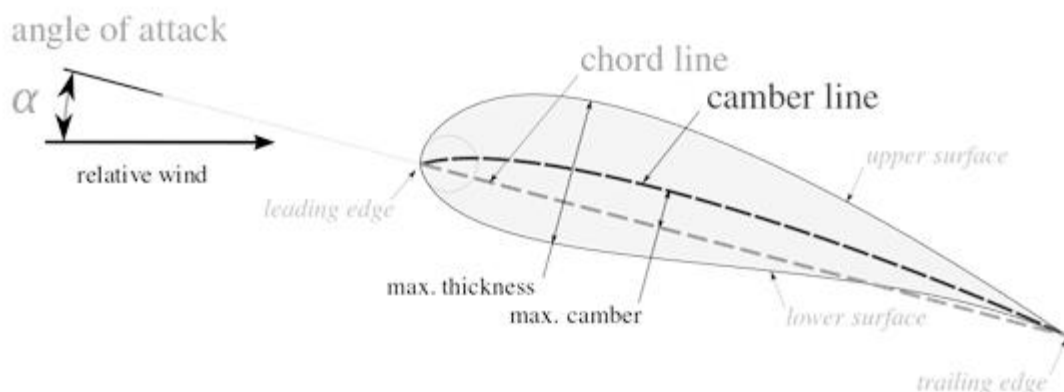


Figura 2.2 - Design di un Airfoil con principali parametri geometrici

L'*aspect ratio* (Ar) è un altro parametro fondamentale ed è definito come:

$$Ar = \frac{Span}{Chord}$$

Un asse metallico risulta libero di ruotare all'interno di due anellini in sottile filo di rame posti ai due estremi, sui punti medi degli elastomeri. Il foil, che risulta solidale all'asse metallico grazie ad un sottile nastro adesivo, è libero di ruotare rispetto agli anellini. Per non interferire sul moto del dispositivo è necessario minimizzare l'attrito volvente presente tra l'asse e gli anellini metallici.

All'estremità frontale dell'asse metallico è stato incollato lo *Scatterer*: un rettangolo dalle ridotte dimensioni il cui compito è quello di facilitare l'acquisizione video del moto, come spiegato in seguito, nel capito di misura (cap. 4): essendo le sue dimensioni molto ridotte non è stato ritenuto significativo il suo contributo fluidodinamico.

I due elastomeri in poliuretano, presentano sezione circolare e sono incastrati alla struttura grazie alla presenza di piccoli fori passanti, dalla dimensione leggermente minore sulle colonne della struttura. Essi presentano una comportamento elastico descrivibile in buona approssimazione dall'espressione:

$$\sigma = G \left(\lambda - \frac{1}{\lambda^2} \right) \quad 2.1$$

In cui:

σ è la tensione nell'elastico.

G è il modulo di elasticità tangenziale.

λ definito come $\frac{L}{L_0}$ è il rapporto tra la lunghezza in stretching (L) e la lunghezza iniziale (L_0).Può anche essere scritto: $\lambda = \varepsilon + 1$

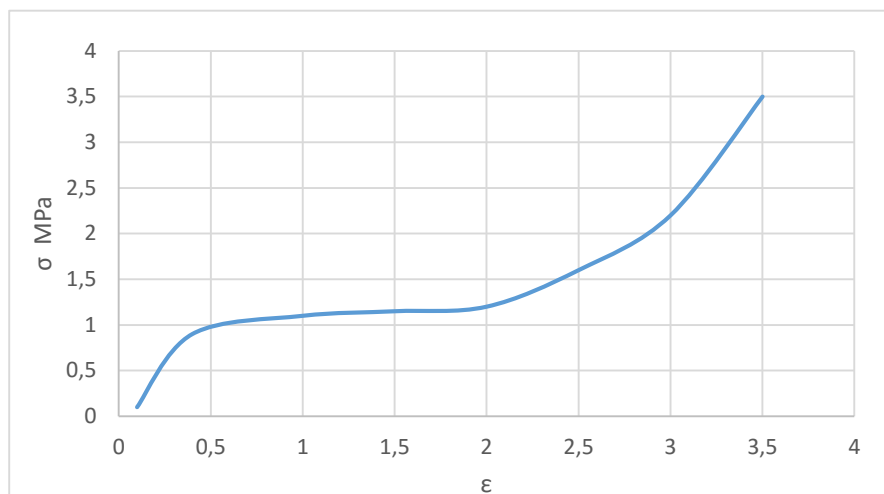


Figura 2.3– Grafico Tensione-Deformazione di una sostanza elastomerica

La figura 2.3 rappresenta l'andamento delle tensioni in funzione della deformazione ottenuto dalla caratterizzazione tramite prova a trazione di un materiale elastomerico. L'andamento generico si può dividere in tre tratti: un primo con andamento approssimabile a lineare, un secondo tratto in cui abbiamo un diminuzione della tensione (detto Plateau) e un terzo di intensificazione, che porta il materiale a rottura. Nello studio del dispositivo, per la valutazione delle forze elastiche, è stato adottato questo modello (non lineare), descritto dall'equazione 2.1.

Per descrivere il comportamento si è rivelata cruciale la determinazione della massa totale della parte mobile (foil, asse e adesivo) m_t che va attentamente calibrata per l'ottenimento di buone prestazioni. Insieme ad essa bisogna considerare la posizione del centro di massa CM, riferito al punto di attacco, che influisce pesantemente sul momento di inerzia dell'ala, modificando le condizioni di equilibrio meccanico all'innesco e a regime.

La struttura portante della parte mobile è invece composta da una piastra sottile di acciaio sulla quale è stato incollato un telaio in ABS (AcrilButadien Stirene), ottenuto mediante stampa 3D. Il particolare della forma può essere apprezzato nella figura 2.1.

Modello meccanico e legge del Moto

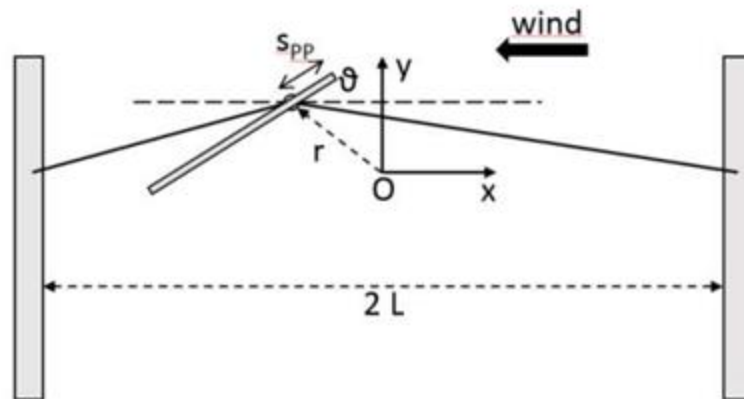


Figura 2.4 – schematizzazione meccanica FLEHAP

Le leggi del moto possono essere derivate dalle equazioni di Lagrange rispetto alle variabili x, y, ϑ definite dalla posizione di $r=(x, y)$ del pivot point e dall'angolo ϑ (positivo se la punta è verso l'alto).

L'energia cinetica del sistema può essere scritta come $T=T_1+T_2$, dove T_1 è l'energia cinetica dell'asse rigido mentre T_2 è l'energia cinetica dell'ala.

$$T_1 = \frac{1}{2} m_a (\dot{x}^2 + \dot{y}^2)$$

dove m_a è la massa dell'asse.

$$T_2 = \frac{1}{2} \int \rho ds [\dot{y} + (s - s_{pp}) \dot{\vartheta} \cos \vartheta]^2 + (\dot{x} - (s - s_{pp}) \dot{\vartheta} \sin \vartheta)^2$$

Dove ρ è la densità dell'ala, s è la variabile che corre lungo il chord dell'ala e s_{pp} è la distanza del pivot point dal leading edge LE.

Dopo l'integrazione T_2 risulta:

$$T_2 = \frac{1}{2} m_w (\dot{x}^2 + \dot{y}^2) + \frac{1}{2} m_w \dot{\vartheta}^2 \left(\frac{c^2}{3} + s_{pp}^2 - 2s_{pp}c \right) + m_w \dot{\vartheta}^2 (\dot{y} \cos \vartheta - \dot{x} \sin \vartheta)$$

Dove m_w è la massa dell'ala e c è la lunghezza del chord. Negli esperimenti trattati in questa tesi $s_{pp} = 0$ perciò risulta:

$$T = T_1 + T_2 = \frac{1}{2} m_t (\dot{x}^2 + \dot{y}^2) + \frac{1}{2} I \dot{\vartheta}^2 + m_w c \dot{\vartheta}^2 (\dot{y} \cos \vartheta - \dot{x} \sin \vartheta)$$

Dove $m_t = m_a + m_w$ è la massa totale del sistema e $I = m_w c^2/3$ è il momento di inerzia dell'ala intorno al pivot point.

Considerando le forze fluidodinamiche e elastiche come esterne al sistema, l'energia potenziale V può essere semplicemente espressa da:

$$V = m_t g y_{CM}$$

dove g è l'accelerazione gravitazionale e y_{CM} la coordinata del centro di massa

$$y_{CM} = \frac{m_a y + m_w [y - (\frac{c}{2} - s_{pp}) \sin \vartheta]}{m_a + m_w} = y - \frac{m_w}{m_a + m_w} \frac{c}{2} \sin \vartheta$$

Se $s_{pp} = 0$

Allora la funzione di Lagrange si esprime:

$$L = T - V = \frac{1}{2} m_t (\dot{x}^2 + \dot{y}^2) + \frac{1}{2} I \dot{\vartheta}^2 + m_w c \dot{\vartheta}^2 (\dot{y} \cos \vartheta - \dot{x} \sin \vartheta) - m_t g y + m_w \frac{c}{2} g \sin \vartheta$$

Le equazioni di Lagrange sono:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial q_i} - \frac{\partial L}{\partial q_i} = 0 \quad i = 1, 2, 3 \quad q_1 = x, \quad q_2 = y, \quad q_3 = \vartheta$$

$$m_t \ddot{x} - \frac{1}{2} m_w c (\ddot{\vartheta} \sin \vartheta + \dot{\vartheta}^2 \cos \vartheta) = 0$$

$$m_t \ddot{y} + \frac{1}{2} m_w c (\ddot{\vartheta} \sin \vartheta - \dot{\vartheta}^2 \cos \vartheta) + m_t g = 0$$

$$I \ddot{\vartheta} - \frac{1}{2} m_w c (\dot{y} \cos \vartheta - \dot{x} \sin \vartheta - g \cos \vartheta) = 0$$

Infine, inserendo le forze esterne otteniamo le seguenti 3 equazioni:

$$m_t \ddot{x} - \frac{1}{2} m_w c (\ddot{\vartheta} \sin \vartheta + \dot{\vartheta}^2 \cos \vartheta) = F_{elx} + D \quad 2.2 \quad \text{Moto } x$$

$$m_t \ddot{y} + \frac{1}{2} m_w c (\ddot{\vartheta} \sin \vartheta - \dot{\vartheta}^2 \cos \vartheta) + m_t g = F_{ely} + L \quad 2.3 \quad \text{Moto } y$$

$$I \ddot{\vartheta} - \frac{1}{2} m_w c (\dot{y} \cos \vartheta - \dot{x} \sin \vartheta - g \cos \vartheta) = M \quad 2.4 \quad \text{Rotazione}$$

In cui D è la forza fluidodinamica di drag, L è la forza di lift e M è il momento che agisce sull'ala nel pivot point e F_{elx}, F_{ely} sono le componenti della forza elastica.

Estrazione Energetica

L'estrazione energetica può avvenire grazie a due differenti strategie: accoppiamento elettromagnetico (EM coupling) con bobina e magneti oppure tramite utilizzo di capacitori elastomerici.

Nel primo caso si sfrutta il fenomeno dell'induzione magnetica, applicando una bobina sul *pivot point*, il quale è dotato di moto oscillatorio verticale. Posizionando una serie di magneti lungo lo scorrimento verticale, si sottopone la bobina ad un gradiente spaziale di flusso magnetico che genera una corrente indotta, secondo la legge di Faraday-Neumann. L'intensità di questa corrente, unita alla tensione ai capi della bobina, determina la potenza elettrica estratta dal sistema. L'utilizzo di un'elettronica appropriata (circuito integrato MOSFET DC/DC converter) permette il raddrizzamento del segnale di tensione e corrente, altrimenti alternato, e l'accumulo in uno speciale supercapacitore. Tuttavia, la corrente indotta all'interno delle bobine, avendo una forma alternata, induce a sua volta un campo magnetico variabile, opposto a quello generato dai magneti permanenti. Questo effetto, denominato freno magnetico, è proporzionale a tale corrente, ed inversamente proporzionale al carico resistivo sul quale essa viene dissipata. Aumentando la resistenza riduciamo la corrente e quindi il freno indotto e viceversa. Una gestione elettronica appropriata può controllare la variazione di resistenza nel tempo per ottimizzare l'estrazione aumentandola o diminuendola in funzione dei parametri meccanici del moto.

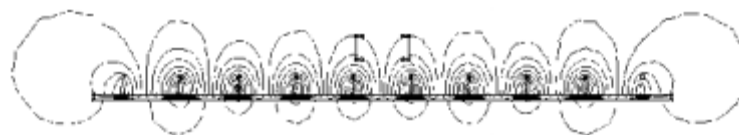


Figura 2.5 – Simulazione FEMM del flusso concatenato ad una bobina (in sezione), su 9 magneti posti a polarità alternata su lastra di Fe dolce.

Nel secondo caso si sfrutta la deformazione di un materiale composito, ottenuto posizionando su un elastomero altamente dielettrico due strati conduttivi sulle facce opposte dell'elastico. Il principio è quello del condensatore di carica elettrica: si caricano con segno opposto le due diverse superfici conduttrici, quando lo stretching del materiale è massimo. In questo modo si riduce al minimo la distanza tra le due facce, come il potenziale elettrico. Il rilassamento (Relaxing) degli elastomeri comporta l'allontanamento degli elettrodi e un avvicinamento delle cariche presenti sulle due armature, determinando un aumento di densità energetica superficiale. Anche in questo caso, con un'opportuna elettronica, è possibile gestire il controllo dell'estrazione, aumentando il potenziale accumulando carica per un numero di cicli sufficientemente elevato, ottenendo, in fase di scarica, una tensione molto superiore a quella iniziale (fino a 100V) [11].

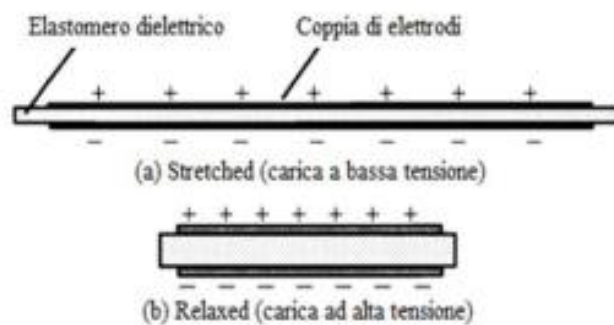


Figura 2.6 – Schema di funzionamento di un condensatore elastomerico

La combinazione di queste due strategie estrattive consente di ottenere una sinergia tra le due fonti. In questo caso la bobina raccoglierà la carica iniziale da inserire nel supercapacitore, la quale sarà movimentata sui condensatori elastomerici tramite elettronica di controllo (per gestire la giusta frequenza).

3 - Apparato Sperimentale

In questo capitolo saranno trattate e descritte brevemente tutte le strumentazioni utilizzate in laboratorio per permettere l'acquisizione delle misure.

Galleria del vento

La galleria del vento in dotazione appartiene alla classe subsonica (con numeri di Mach inferiori a 0,75) a circuito aperto e a sezione di prova quadrata. Il suo schema può essere rappresentato dalla figura seguente:

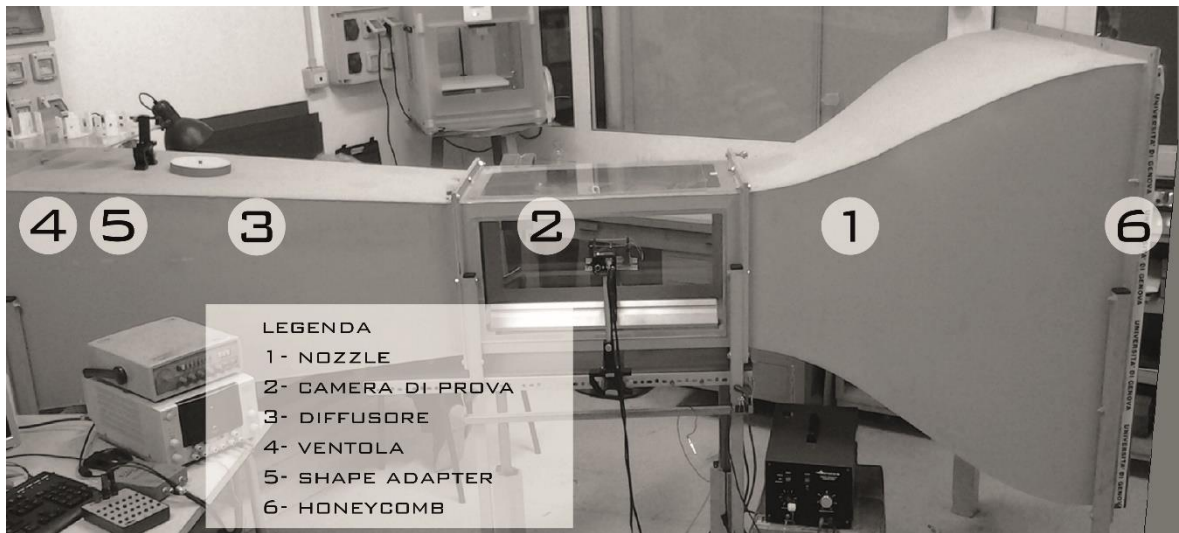


Figura 3.1 – Schema rappresentativo della galleria del vento, con le sue componenti

1 – **Nozzle**: è la parte convergente del tunnel, la sezione diminuisce perciò in esso l'aria accelera riducendo il livello di turbolenza e lo spessore dello strato limite sulle pareti. Acciaio. 2mm spessore.

2 – **Camera di prova**: in questa parte l'aria ha la velocità massima (sezione minima) e al suo interno vengono eseguite le prove. Il modello ha dimensione molto minore della sezione della camera di prova, in modo tale da non ostruire eccessivamente il flusso. Acciaio. 3 finestre in legno 1 in Plexiglass (frontale). 0,4x0,4x0,7m.

3 – **Diffusore**: qui l'aria decelera, per motivi di potenza assorbita. Per costruzione è sfavorevole per la separazione dello strato limite perciò presenta angolo di diffusione minore dei 3 gradi. Acciaio.

4 – **Ventola**: Il motore utilizzato è asincrono trifase a regolazione di potenza, e la ventola è coassiale ad esso. E' dotato di pale progettate per garantire la massima aspirazione.

5 – **ShapeAdapter**: è la parte che collega diffusore a ventola. Permette il cambio di forma di sezione, da quadrata a circolare, per meglio assecondare la forma della ventola.

6 – **Honeycomb**: è un pannello a nido di ape posizionato prima del *Nozzle*. Grazie alla sua forma direziona l'aria esterna inducendola a formare piccoli "filetti". Policarbonato. 1,1x1,1m². Canali esagonali lato 4mm profondità 30mm.

Reti Antiturbolenza: sono reti che spezzano vortici e turbolenze e sono utilizzati per "pulire" il flusso. Deviano leggermente il percorso dell'aria e per questo sono posizionate vicino all'*Honeycomb*.

SettlingChamber: è l'estensione del *Nozzle* ottimizza la canalizzazione del flusso. Nella galleria del vento utilizzata in questa tesi questa parte non è presente poiché la sua applicazione comporterebbe un cambiamento non significativo.

La velocità all'interno della camera di prova è ottenuta da un parametro di conversione relativo alla tensione applicata ai capi del motore:

$$TtoV = 1.62 \left[\frac{V}{\frac{m}{s}} \right]$$

Essa è stata stabilita mediante misurazione con sonda Cobra e confermata dall'acquisizione video.

Camera

Per le riprese è stata utilizzata una *Fastec IL3100-SM4*. Lo strumento è stato posizionato su un supporto fisso, collegato alla galleria del vento e punta il centro della camera di prova, dal lato del pannello in Plexiglass. Permette di effettuare video ad alta risoluzione e con elevato numero di Frame per Secondo (FPS), necessari per una più precisa visualizzazione del moto. Presenta inoltre shutter elettronico regolabile, che risulta fondamentale per effettuare riprese in movimento dettagliate.

Elenchiamo qui le sue principali caratteristiche:

Risoluzione: 1280x1024 maximum

FPS: fino a 500 frame per secondo

Storage: fino ad un TB interno, dipende dalla memoria inserita

Shutter: elettronico globale da $2\mu\text{s}$ fino a 41,667ms



Figura 3.2 – Camera utilizzata per le riprese in galleria del vento.

Generatore di fumo

Per il generatore di fumo non si è fatto affidamento su un prodotto commerciale, ma si è optato per una soluzione ad hoc che potesse rispondere meglio alle necessità della prova. Il sistema è costituito da una pompa peristaltica che, in maniera proporzionale alla tensione applicata, fornisce olio medicinale al circuito. Le gocce di liquido

percorrono un filo metallico verticale, appositamente posto all'inizio della camera di prova. Il filo metallico, collegato ad un generatore di corrente regolabile, viene fatto scaldare per effetto Joule. L'olio evapora a contatto con il filo, quando esso raggiunge una temperatura sufficientemente elevata, generando un serie di "filetti" di fumo, molto densi, che permettono un'ottima visualizzazione del flusso.

Questa soluzione presenta però alcuni svantaggi. In primo luogo la temperatura elevata del filo comporta un riscaldamento dell'olio al quale corrisponde una brusca diminuzione della viscosità. Questo permette al liquido di scivolare più rapidamente evaporando a "intervalli" di filo più ampi, riducendo la densità di filetti e la loro durata. Un altro problema è causato dalla velocità eccessiva del vento. In questo caso l'effetto indesiderato è duplice: induce vibrazioni sul filo e ne aumenta lo scambio termico, riducendone la temperatura. Nel primo caso provoca la visualizzazione di piccole "ondine" sulle linee di fumo, alterandone la veridicità, nel secondo caso non permette l'evaporazione corretta dell'olio. In questo caso è necessario aumentare la quantità di corrente che fluisce nel filo e quindi la potenza termica entrante.

Cella di carico

Per l'acquisizione diretta delle forze sul dispositivo è stata utilizzata una cella **3A60-10N-D11**, prodotta da Interface Advanced Force Measurement. Fornisce il valore della



Figura 3.3 – Interface Advanced Force Measurements, cella di carico utilizzata per le misure di forza.

forza lungo tre assi perpendicolari con capacità massima di 10N. La sua frequenza di acquisizione nominale è di 250Hz regolabile. Il segnale in uscita è gestito da un software dedicato. E' stata avvitata nella parte sottostante il supporto metallico del dispositivo. Alluminio. 60x60x26mm.

Alimentatore DC

Per l'alimentazione della strumentazione elettrica è stato utilizzato un banco digitale **IPS 2303S** della ISO-TECH. Esso offre controllo mediante pannello digitale, 4 set di memorie di configurazione e risoluzione elevata di 1mV e 1mA con uscita pulita e stabile. Gestisce due canali di collegamento separati. Potenza 180W.

Illuminazione

Per l'apparato di illuminazione in camera di prova si è utilizzato un **faro LED da 1700 lumen 220V – 20W**. Esso emette un fascio luminoso bianco performante sia nell'angolo che nella profondità di illuminazione.

E' stato utilizzato anche un **laser a linea**, prodotto da Z-Laser, per consentire una precisa illuminazione di singole parti a faro LED spento.

Ambiente di calcolo

Per l'analisi dei dati è stato utilizzato l'ambiente di calcolo numerico MATLAB. Con esso sono stati analizzati tutti i vettori e le matrici di misura. Per una descrizione accurata dei processi di calcolo vedere Capitolo 4 – Misure ed analisi dei dati.

4 - Risultati Sperimentali

Scelta dei parametri

Al fine di permettere una riproducibilità tra le misure effettuate e le simulazioni numeriche, si è optato per una configurazione snella del dispositivo, ossia in assenza di EMC (accoppiamento elettromagnetico) e avente *Pivot Point* coincidente con LE (*LeadingEdge*), in maniera analoga a quanto visto nelle equazioni di Lagrange (Eq. 2.2 – 2.3 – 2.4). In questo modo si riducono le variabili in gioco e risulta meno difficoltoso lo studio delle relazioni tra di esse.

Come già introdotto nel capitolo 2, risulta interessante l'applicazione di FLEHAP per numeri di Reynolds limitati e, contemporaneamente, in un intervallo di frequenze e ampiezze prossime al transitorio. Per intercettare in fase di misura un comportamento tale a velocità relativamente basse, come già analizzato da studi precedenti [12], avendo fissato la massa del dispositivo, si opera sul *pre-stretching* e sulla tensione a riposo degli elastomeri. Per di più, la velocità ridotta facilita la visualizzazione del fumo. Esso risulta infatti più definito e denso, come descritto nell'apparato sperimentale (Cap. 3), rendendo più efficace la visualizzazione dei vortici. Anche l'acquisizione video e della cella risulta favorita: questo poiché a velocità inferiori corrispondono frequenze di oscillazione del dispositivo minori e quindi, fissate le frequenze di acquisizione dei sensori (cella-camera), avremmo un numero più elevato di rilevazioni per ciclo, necessarie per una descrizione più precisa delle forze.

Premesso ciò, si tiene un elevato rapporto di fedeltà tra le prove di calcolo numerico, svolte separatamente negli uffici del DICCA, e le misure in galleria del vento, avvicinandosi il più possibile ad un'omogeneità strutturale ma anche dei parametri, per permetterne un confronto accurato.

Il modello utilizzato presenta le seguenti caratteristiche:

L'andamento delle forze fluidodinamiche è stato studiato al variare della velocità del vento, pre e post transizione con la configurazione di FLEHAP attuale (Cap. 2) avente parametri pocanzi citati. Le prove sono state realizzate a velocità del vento di 3,5 – 4,0 – 4,5 – 5 m/s alle quali sono state assegnate per praticità, rispettivamente, le sigle U35 U40 U45 U50.

Setup sperimentale

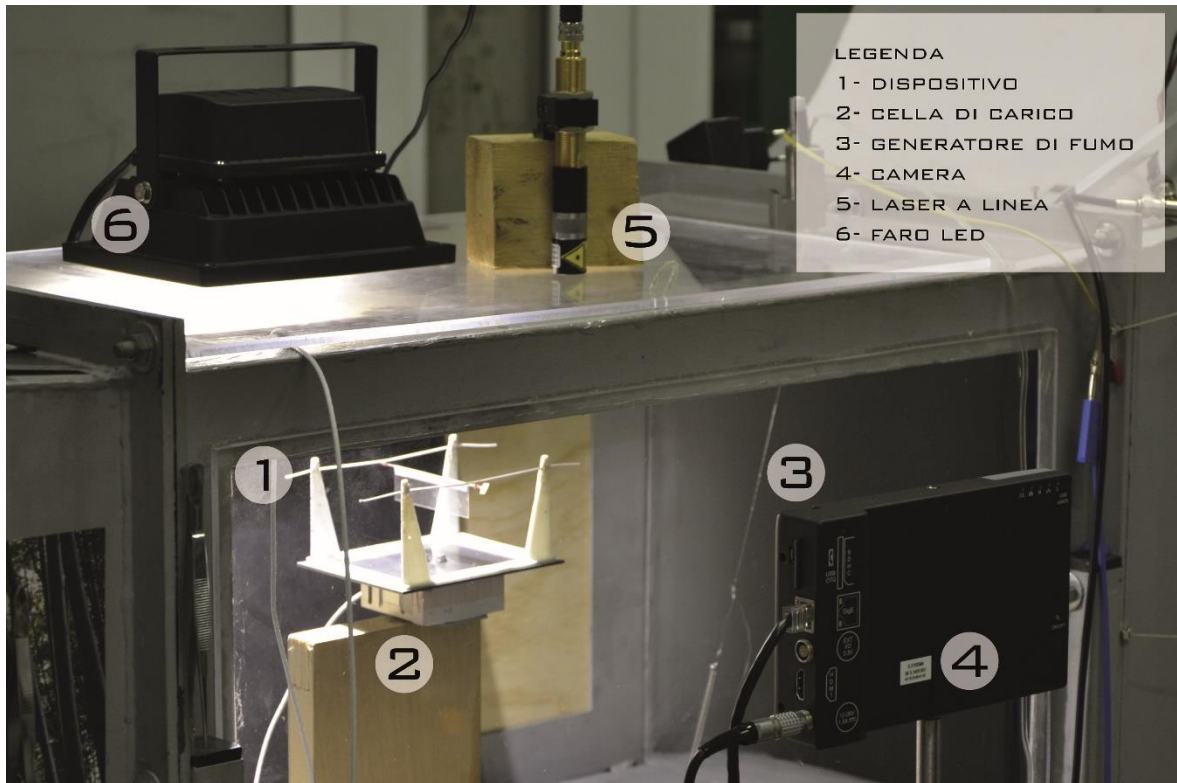


Figura 4.1 – Setup sperimentale in cui si può osservare la disposizione della strumentazione in camera di prova.

La misurazione è stata svolta all'interno della camera di prova della galleria del vento con il supporto della strumentazione introdotta nel capitolo 3.

Il modello è stato inserito in posizione centrale nella camera di prova, sia rispetto all'altezza della stessa, sia rispetto alla lunghezza. In questo modo si riducono gli effetti viscosi di strato limite che si sviluppano in prossimità delle pareti (minore di 50mm), e si opera con fluido a velocità uniforme. Inoltre la vena fluida, deformata dall'azione del dispositivo, non deve interferire con le pareti. Questo comporterebbe linee di flusso più addossate e quindi un comportamento discordante da quello in atmosfera libera.

La cella di carico è stata avvitata, grazie alla presenza di due fori filettati sulla sua faccia superiore, alla piastra in acciaio sulla quale è incollato il telaio del dispositivo. La cella rappresenta idealmente un vincolo di incastro e misura così le reazioni vincolari complessive della struttura soprastante. Fornendo misure su tre assi distinti, x e z ,

registra rispettivamente le forze orizzontali, laterali e verticali totali; scelte successive renderanno chiaro come sia possibile ottenere le forze fluidodinamiche agenti sul foil a partire da queste ultime.

Tuttavia la sovrapposizione della sola cella e del dispositivo non ha permesso di raggiungere la posizione centrale richiesta pocanzi. E' stato aggiunto perciò un supporto in legno che permettesse un corretto posizionamento all'interno della camera. Esso deve offrire una ridotta superficie resistente al flusso in arrivo per non alterare l'incidenza dello stesso sul modello. Perciò è stata preferita una forma prismatica a base rettangolare, con il lato maggiore allineato con la direzione del vento. La cella è stata fissata con viti al supporto sulla parte superiore.

La telecamera è stata posizionata su un supporto regolabile, all'esterno della galleria del vento, puntata verso la parete in plexiglass della camera di prova. Si trova ad una distanza di 40cm dal modello. Al fine di ottenere una corretta elaborazione delle immagini, per evitare errori di parallasse in fase di conversione pixel-to-mm, deve soddisfare due importanti requisiti: perpendicolarità frontale e perpendicolarità laterale. La telecamera deve essere in grado di mantenere il fuoco contemporaneamente sulle linee di fumo e sullo *Scatterer* (vedi cap. 2).

Il generatore di fumo è stato posizionato all'ingresso della camera di prova. Esso deve permettere la messa a fuoco della telecamera, perciò il fumo deve percorrere una traiettoria prossima al bordo laterale del foil, vicino allo *Scatterer*. Si è dovuto trovare un compromesso di posizionamento a causa degli effetti tridimensionali, cioè i vortici laterali (fig. 4.2), che ne disturbano l'andamento. Il fumo scorre circa ad un quarto Span di distanza dallo *Scatterer*.

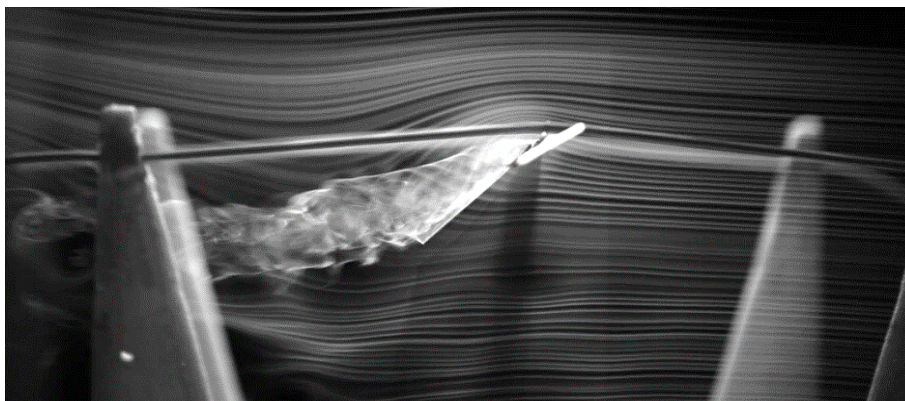


Figura 4.2 – Particolare di vortici laterali, visualizzati se il fumo scorre troppo vicino al bordo d'ala.

L'illuminazione deve permettere una corretta visualizzazione delle immagini, con buona risoluzione e definizione. Per ottenere questo risultato l'intensità della luce deve essere massima ed uniforme. In questo modo è possibile diminuire lo *shutter* della telecamera riuscendo ad ottenere ottime immagini in movimento. La luce è stata posizionata sul pannello superiore alla camera di prova. E' stato notato che un'illuminazione perfettamente verticale al di sopra del fumo non permetteva una giusta visualizzazione, questo poiché si sperimentava un effetto ombra tra i filetti di fumo. Si è optato per un posizionamento decentrato e traslato verso la parte posteriore della camera di prova. In questo modo si ottiene una miglior illuminazione dei vortici, che si sviluppano e vengono trasportati dal flusso verso il diffusore della galleria. Per aumentare ulteriormente la definizione delle vene fluide è stato incrementato il contrasto, ottenuto mediante ombreggiamento del pannello posteriore.



Figura 4.3 – Illuminazione dello Scatterer a faro LED spento, necessaria per la corretta elaborazione video dei moti.

Il laser a linea è stato posizionato sul pannello superiore della camera di prova. La linea di luce generata deve illuminare lo *Scatterer*, in modo completo, nella totalità del suo moto. Per verificare il corretto posizionamento si effettua un'acquisizione video a faro LED spento e laser acceso e si controlla che lo *Scatterer* sia illuminato in ogni punto del suo moto (fig. 4.3).

L'alimentatore CC, con due canali in uscita, è stato collegato rispettivamente al motore trifase della ventola della galleria e alla pompa peristaltica del generatore di fumo. Il Generatore di corrente è stato collegato alla componente resistiva del generatore di fumo (filo verticale).

Misure ed analisi dei dati

Per consentire un'acquisizione del moto e delle forze più precisa è stata massimizzata la frequenza di acquisizione dei dispositivi di misura, ovvero della cella di carico e della camera. In questo modo si aumenta il numero di misurazioni per ciclo, necessarie per un'accurata descrizione fluidodinamica.

- **Frequenza acquisizione cella di carico:** 250 Hz nominali (circa 205Hz reali)
- **Frequenza acquisizione camera:** 411 FPS

La misura è stata svolta senza l'ausilio dell'impianto di illuminazione del laboratorio. Questo poiché le lampade Neon a disposizione possiedono una frequenza di illuminazione assai esigua (100Hz) in confronto a quella della camera e si può sperimentare sull'acquisizione video una variazione di luce fotogramma per fotogramma. Per l'illuminazione si fa riferimento all'attrezzatura descritta nel capitolo 3.

La **catena di misura**, per ogni velocità del vento, presenta le seguenti fasi:

In un primo momento si attiva la cella di carico e si acquisisce il suo zero di misura⁽¹⁾ in assenza di vento. Essa infatti emetterà un segnale regolare di forza anche in assenza di sollecitazioni. Questo segnale, chiamato di riposo, viene sottratto alle misure svolte successivamente. Per ottenere un valore affidabile si calcola lo zero effettuando la

media su un intervallo di tempo sufficientemente ampio (10-20s). Dopodiché si apre il canale di comunicazione tra alimentatore e ventola e comincia a fluire aria all'interno della camera di prova. Il vento induce le oscillazioni sul dispositivo, portandolo a regime nel moto (2). Contemporaneamente si rende attivo il generatore di fumo, il quale comincerà ad evidenziare il flusso all'interno della galleria. Si avvia poi la camera (3), la cui registrazione dura al massimo 6 secondi, avendo impostato la sua memoria massima di salvataggio a 4GB. A metà video si spegne il faro LED per permettere l'acquisizione video dei moti, grazie allo *Scatterer*, e verso la fine, prima della conclusione dell'acquisizione video, viene impartita una sollecitazione verticale sulla parte inferiore della camera di prova (parte nella quale è avvitata la struttura con la cella) (4). Il colpo ha il compito di sincronizzare cella e camera, poiché esse non possiedono trigger elettronico unico e sono avviate separatamente.

Per l'**acquisizione dei moti tramite video** si sfrutta la seconda porzione di ripresa, ossia a faro LED spento e con *Scatterer* illuminato. Si carica in MATLAB l'intera acquisizione della camera e si sceglie l'intervallo di fotogrammi a luce spenta che si vuole analizzare. Il programma analizza ogni frame nell'intervallo, cercando tutte le zone più chiare di un certo livello di soglia e, al loro interno, cerca un rettangolo di una data dimensione. Per ogni rettangolo calcola infine centro e angolo di orientamento. Si ottengono così dei vettori di posizione, in pixel, del PP rispetto all'asse $x - y$ e l'angolo ϑ di rotazione dell'ala, a meno di alcuni fattori di correzione. Questi sono invece ottenuti mediante analisi di un'immagine del dispositivo a riposo, con camera in posizione analoga a quella di misura (fondamentale per evitare errori di conversione e di riferimento), e con illuminazione intensa. Si individuano le posizioni sull'immagine (coordinate sempre in pixel) di: V1 e V2, punto di vincolo tra elastici e struttura rispettivamente a destra e a sinistra; di PP00(x,y), punto di intersezione tra la congiungente tra V1 e V2 e la retta verticale passante per il *chord* del foil (punto di equilibrio in assenza di gravità); viene calcolato l'angolo ϑ_{corr} di orientamento a riposo dello *Scatterer* e infine si ricava la conversione pixel in millimetri, eseguendo il rapporto tra la distanza in pixel tra V1 e V2

e l'analogha distanza in millimetri, misurata precedentemente e nota. In questo modo è possibile risalire alle posizioni in millimetri partendo dalle analoghe in pixel. Dopo aver corretto i vettori posizione e angolo con i fattori descritti, si ricavano le equazioni di spostamento orizzontale, verticale del Pivot Point, coincidente con il Leading Edge (*Plunging*), e di rotazione del foil (*Pitching*), nel tempo.

La cella di carico elabora una matrice di misura a tre colonne x,y,z alle quali sono associate le rilevazioni sulle tre diverse direzioni: orizzontale, laterale e verticale. Per come è stata posizionata la cella misura forze positive se dirette verso il basso e verso l'ingresso della camera di prova, perciò si è effettuata un'inversione dei suoi valori, coerentemente al sistema di riferimento cinematico (fig. 2.4). Essendo la matrice molto ampia, si sceglie un intervallo di misure tra un secondo e i due prima del colpo finale. In questo modo si riducono gli effetti di transitorio tra dispositivo a riposo e a regime e gli effetti di smorzamento della struttura dovuti al colpo. Si considerano quindi una decina di cicli, sia per le forze totali verticali sia per quelle orizzontali, i quali sono opportunamente sovrapposti in un unico periodo mediante l'uso di un particolare programma MATLAB. A questo punto, per ogni valore di tempo, associamo un numero di misure pari al numero di cicli precedentemente scelto. Si effettua quindi la media dei valori per ogni istante e si ottengono due cicli il cui andamento riassume ottimamente quello di tutti gli altri. Mediante una combinazione di funzioni di *spline* e di interpolazione, otteniamo un vettore passante per i punti precedentemente calcolati, ma avente una dimensione assai più elevata.

Lo stesso procedimento è svolto per lo spostamento orizzontale e verticale del Pivot Point, nonché per l'angolo di attacco ϑ , calcolati con l'acquisizione dei moti tramite video. Anche in questo caso si ottengono vettori con dimensione elevata.

Al fine di sincronizzare forze e moti in un unico periodo, e legare quindi tutte le variabili del problema fluidodinamico, è stato ipotizzato che al minimo della forza verticale (coerenza segni, perciò verso il basso) dovesse corrispondere la minima posizione del

Pivot Point. A questo punto si scelgono molto precisamente il primo e l'ultimo punto del periodo selezionato, ossia il minor valore del *displacement* e il minor valore della forza totale verticale; si "taglia" il vettore e si isola l'intervallo di valori tra i suddetti minimi, si effettua lo stesso procedimento sui vettori di spostamento orizzontale e angolo (con gli stessi intervalli del *displacement*) e su quello di forza orizzontale (con gli stessi intervalli della forza verticale). Così, ogni vettore è sottoposto ad un ulteriore *spline*, il quale compito è quello di normalizzare il numero di valori presenti nel ciclo, ossia 5000, seguendo una scala di tempo anch'essa normalizzata e contenente 5000 valori, da 0 a 1.

Si ottiene così un insieme di vettori di egual lunghezza il cui andamento descrive quello del parametro nel singolo periodo e la cui scala di tempo è normalizzata rispetto al periodo stesso (t/T). Inoltre, ad ogni valore temporale di un parametro ne è sempre associato uno di ogni altro, sia esso cinematico o dinamico (fig. 4.5).

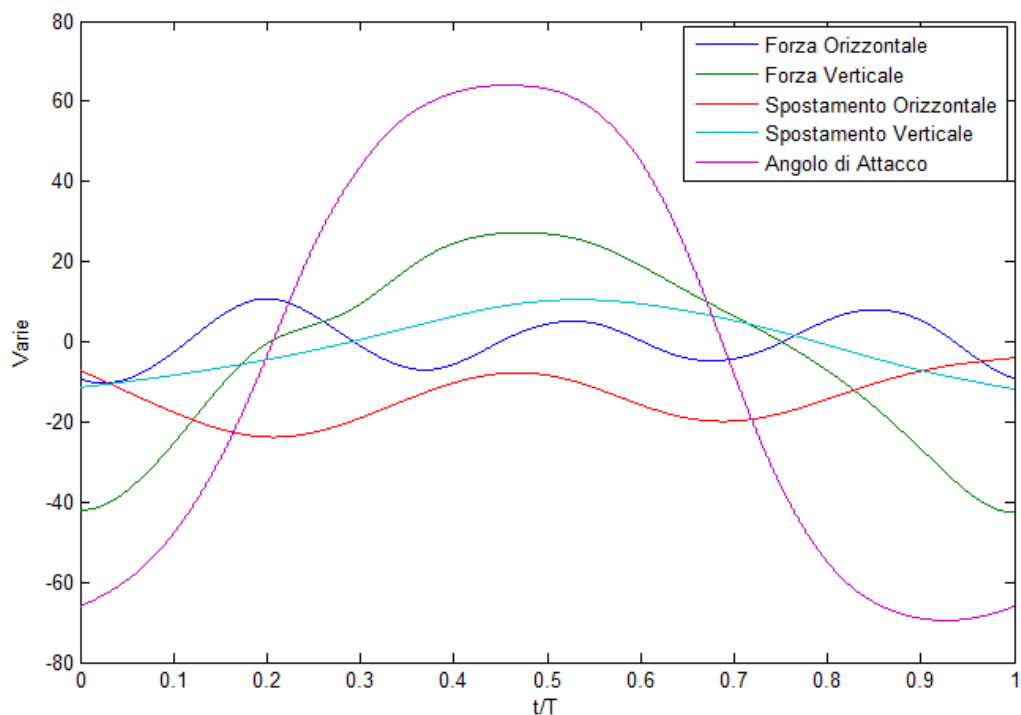


Figura 3 – Rappresentazione grafica dell'andamento di tutte le variabili nel periodo.

Le traiettorie possono essere ricavate conoscendo lo spostamento nel tempo del Leading Edge e del Trailing Edge ma, essendo il primo coincidente con il Pivot Point, esso è facilmente determinabile dai vettori dei moti. Per quanto riguarda il Trailing Edge, le sue coordinate sono ricavabili dalle equazioni 4.1 e 4.2. L'andamento è apprezzabile in fig. 4.5.

$$TE_x = PP_x - C \cos(\vartheta) \quad 4.1$$

$$TE_y = PP_y - C \sin(\vartheta) \quad 4.2$$

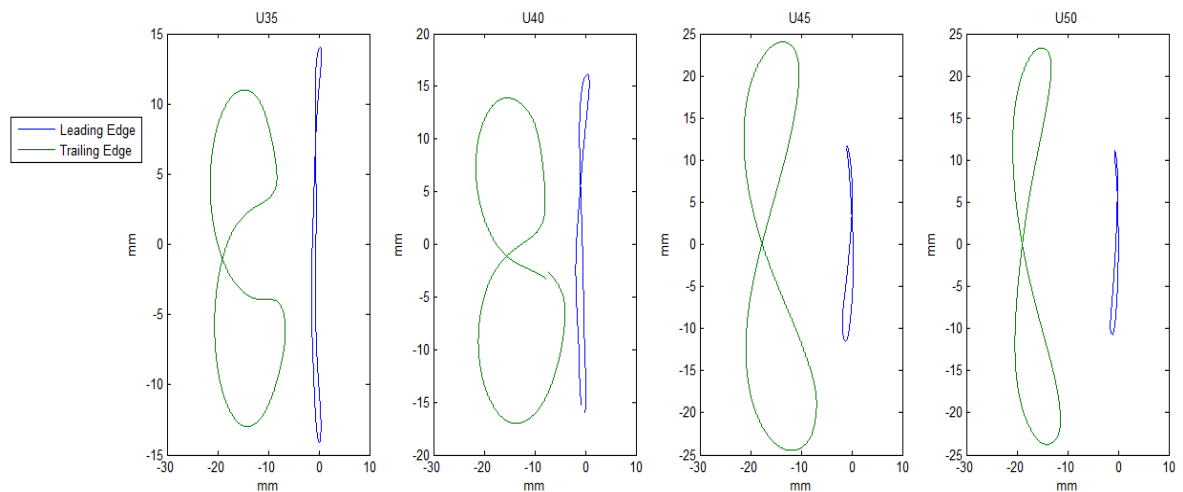


Figura 4.5 – Andamento delle traiettorie per le diverse velocità del vento.

Per quanto riguarda invece lo studio della frequenza e dell'ampiezza di oscillazione del dispositivo, esse sono ricavate attraverso la ricerca di picchi e avvallamenti nelle funzioni non ancora *splinate* e ottenute mediante calcolo della media su un numero di cicli molto ampio. Si osservino i risultati nella fig. 4.6.

Otteniamo una brusca diminuzione di frequenza e ampiezza, tra i 4 e i 4,5m/s di velocità del vento, che è associabile alla transizione del dispositivo. La misura effettuata si pone a cavallo di questo comportamento, permettendo uno studio accurato dei fenomeni che la determinano.

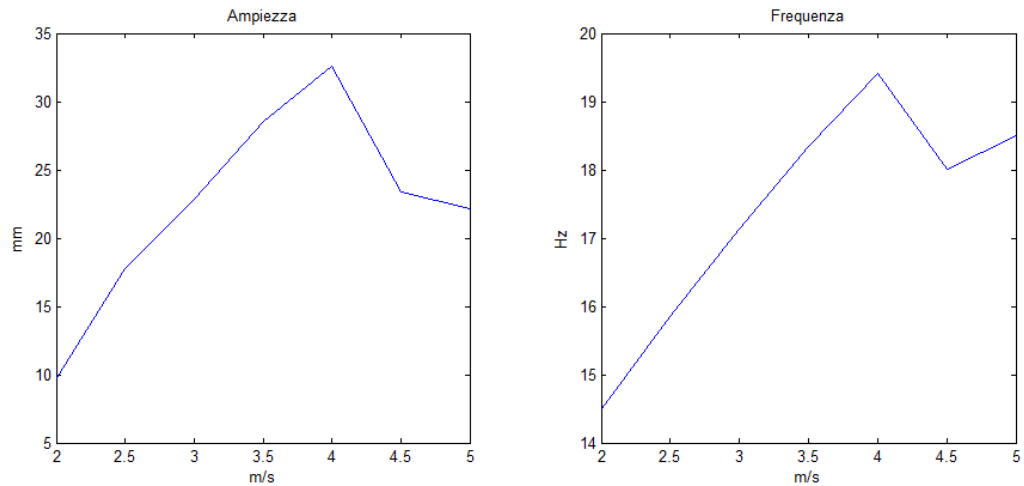


Figura 4 – Andamento di Frequenza e Ampiezza intorno alla transizione.

Tuttavia non è stato ancora ottenuto il valore della forza fluidodinamica agente sul foil ma solo quella totale sulla struttura, rispetto ai tre assi. Per risalire a quella fluida si fa riferimento alle equazioni 4.3 4.4 4.5, in cui la prima è riferita al sistema fisso del modello, solidale con la cella, mentre le restanti sono riferite alla parte mobile (foil asse adesivi).

$$F_{mis} = F_{ifs} + F_{elast} + P_{disp} \quad 4.3$$

$$m_{tot}a_x = \sum F_x = F_{el_x} + D \quad 4.4$$

$$m_{tot}a_y = \sum F_y = F_{el_y} + L + P \quad 4.5$$

In cui: F_{mis} è la forza totale misurata; F_{ifs} è la forza che nasce dall'interazione fluido-struttura sul supporto del dispositivo stesso in assenza di ala (fig. 4.7) e l'andamento è riportato in fig. 4.8; F_{elast} , F_{el_x} , F_{el_y} sono rispettivamente: la forza sviluppata dagli elastici sul supporto del dispositivo e le componenti della stessa forza elastica riferite alla parte mobile; m_{tot} è la massa totale della parte mobile; a_x è l'accelerazione orizzontale del CM della parte mobile; a_y è l'accelerazione verticale del CM della parte mobile; P_{disp} è la forza peso del dispositivo (struttura elastici foil); D è la forza di Drag sul foil; L è la forza di Lift sul foil; P è la forza peso della parte mobile.

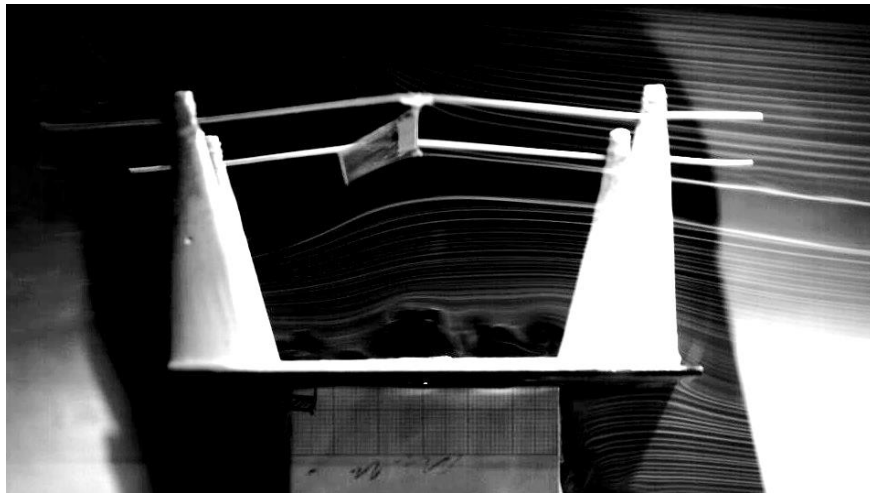


Figura 4.7 – particolare di interazione fluido-struttura con supporto dispositivo.

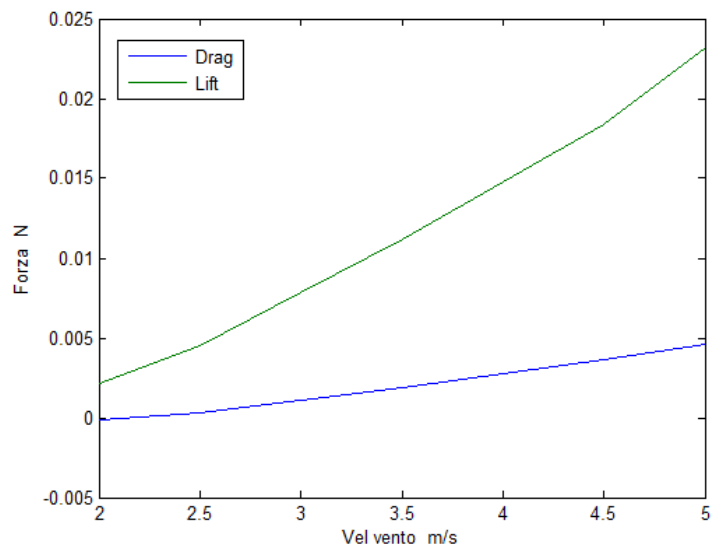


Figura 4.8 – Andamento delle forze fluidodinamiche generate sul supporto del dispositivo (Fifs).

Come si può notare dalla fig. 4.8, al contrario di quanto sarebbe ragionevole supporre, il contributo di Lift sulla struttura è molto maggiore rispetto di quello di Drag. La superficie utile esposta al vento è infatti molto ampia e dovrebbe favorire il Drag mentre il contributo di Lift per una lastra orizzontale dovrebbe risultare esiguo. Tuttavia ricordiamo che la cella misura la reazione vincolare sull'incastro superiore e perciò non misura alcun contributo di forza sul fianco stesso, riducendo drasticamente la forza di Drag totale misurata. Inoltre, come si può notare nella fig. 4.7, il flusso di aria che interagisce con il fianco della cella viene deviato in tutte le direzioni, compresa la

verticale, direzione per la quale incontra la lamina superiore in acciaio. Si crea perciò una zona ad alta pressione che incrementa il contributo di Lift sulla struttura.

Dall'equazione 4.3 possiamo esplicitare il valore della forza elastica la quale verrà inserita nelle equazioni 4.4 e 4.5 previa scomposizione in componenti. Attraverso il vettore PP (PPx, PPy) e dell'angolo di attacco (ipotizzando che il foil sia estremamente rigido e non subisca deformazioni) ricaviamo le coordinate del CM e il suo vettore posizione, molto similmente a quanto visto per il TE nelle equazioni 4.1 e 4.2, attraverso le equazioni 4.6 e 4.7.

$$CM_x = PP_x - CM \cos \vartheta \quad 4.6$$

$$CM_y = PP_y - CM \sin \vartheta \quad 4.7$$

Dal vettore posizione del CM si può ricavare, attraverso un'opportuna derivazione in MATLAB, la velocità e l'accelerazione del centro di massa del sistema oscillante. Ciò permette di proseguire senza l'ausilio del calcolo delle accelerazioni angolari (necessarie invece per le equazioni di Lagrange, 2.2 2.3 2.4), utilizzando le equazioni 4.4 e 4.5. E' stato ottenuto quindi il valore delle forze fluidodinamiche totali di Lift e di Drag nel periodo con un vettore di 5000 punti (come per tutte le altre variabili), il cui andamento è espresso dalle figure 4.9 e 4.10.

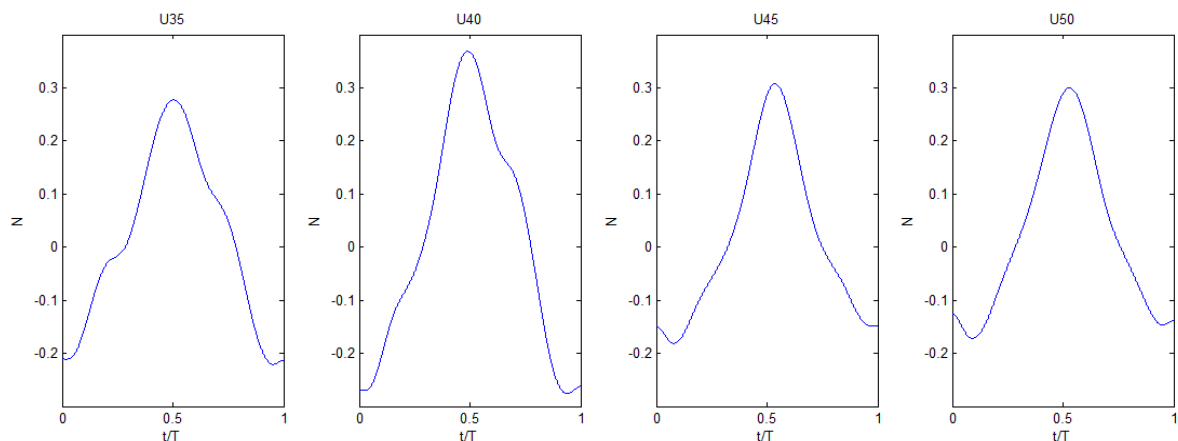


Figura 4.9 – Andamento forze di Lift nel periodo per diverse velocità del vento.

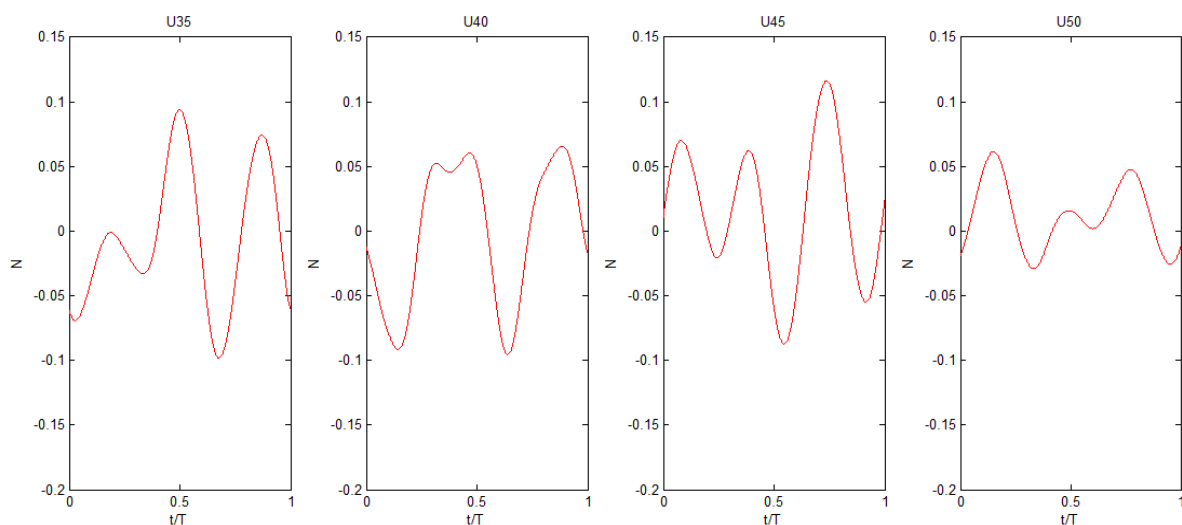


Figura 4.10 - Andamento forze di Drag nel periodo per diverse velocità del vento.

Per quanto riguarda il Lift, l'andamento generale alle diverse velocità del vento risulta omogeneo e presenta una fase di crescita a partire dal minimo PPy e una successiva fase di decrescita, la quale si ricongiunge, a meno di un piccolo errore, al valore iniziale della forza. Per quanto riguarda il Drag non si può affermare quanto detto. Infatti l'andamento è fortemente variabile, sebbene comunque presenti una frequenza propria che è sempre doppia rispetto a quella del Lift.

In fluidodinamica classica, quando si studia l'andamento delle forze su un airfoil, si fa sempre riferimento all'angolo di attacco ϑ e a come l'andamento delle stesse sia legato ad esso. Normalmente l'andamento è lineare nel primo tratto, in cui le forze crescono insieme all'angolo dopodiché, per la componente verticale, per un valore di circa 14-15°, si verifica il fenomeno dello stallo e si affronta una brusca riduzione. L'effetto dipende dal distacco della vena fluida sulla parte posteriore dell'ala. Per il dispositivo utilizzato in misura, il fenomeno è completamente differente. Abbiamo a che fare infatti con un sistema dinamico, in movimento, che varia i parametri di moto in funzione della velocità del vento. In particolare, abbiamo un determinato andamento del *Pitching* (rotazione, variazione di ϑ) nel tempo che interagisce pesantemente sullo scambio di forze tra fluido e struttura. Non solo, infatti alla rotazione dell'ala è associato anche uno spostamento del PP nel tempo, definito *Plunging*, il quale interferisce anch'esso sullo

scambio. La combinazione di questi due moti dà sviluppo a vorticosità del tutto singolari, apprezzabili nella fig. 4.11.

Le vorticosità rappresentano il nucleo di sviluppo dell'interazione fluido-struttura e sono responsabili della nascita di forze anche di grande entità. Alle alte velocità di circolazione dei vortici corrispondono infatti forti depressioni, le quali generano sollecitazioni, spostandosi sul foil. Lo studio della creazione del vortice e del suo spostamento, unito alla sua deformazione, prende il nome di *Vortex Shedding*. Risulta fondamentale perciò lo studio dei parametri che regolano lo sviluppo di queste entità. In figura 4.12 sono rappresentati gli andamenti di *Pitching* e *Plunging* alle diverse velocità del vento.

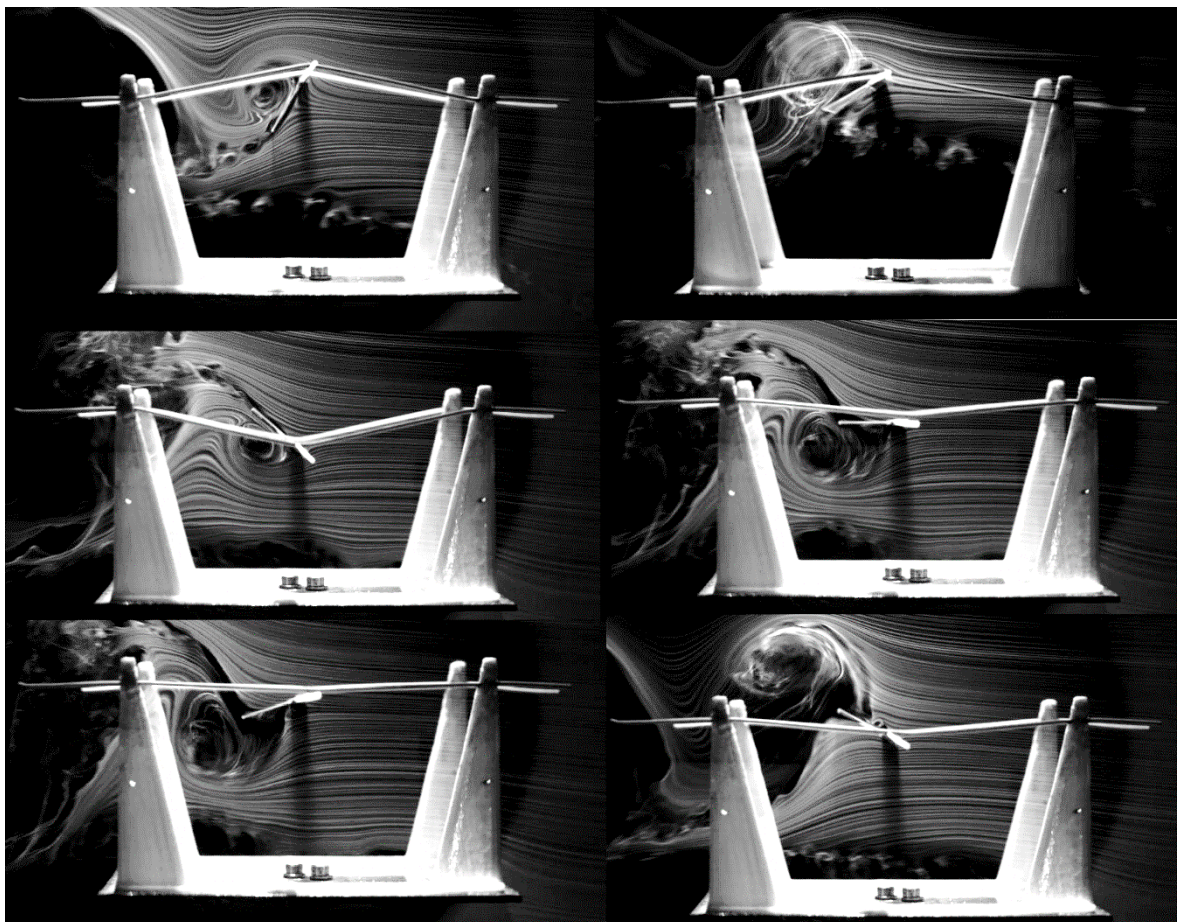


Figura 4.11 – Vorticosità generatosi dalla combinazione di *Pitching* e *Plunging*.

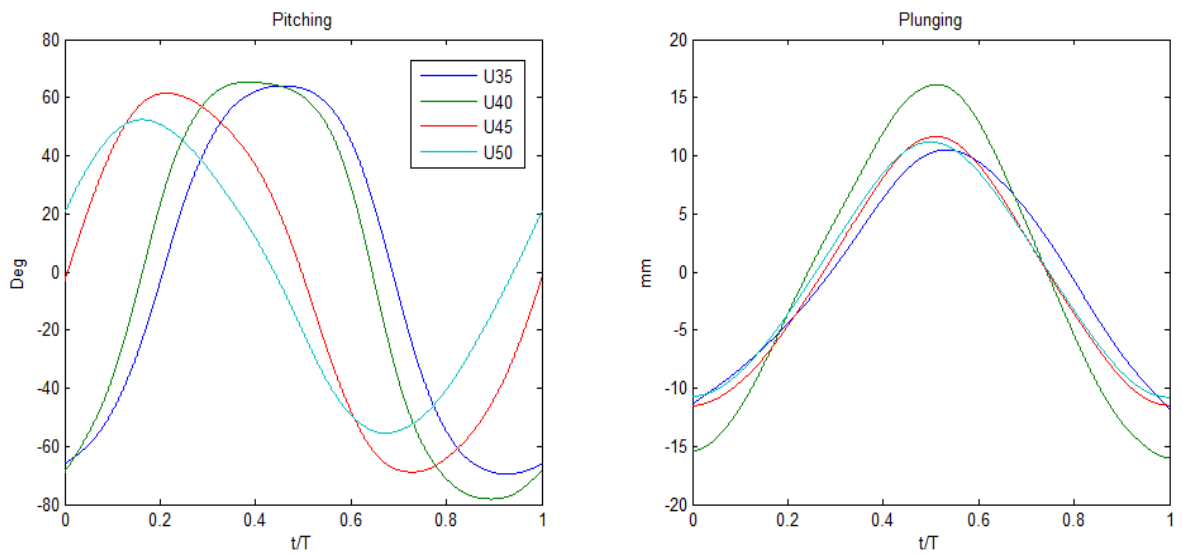


Figura 4.12 – Andamento di Pitching e Plunging nel periodo, per le diverse velocità del vento.

Il valore massimo e minimo dell'angolo di attacco non varia esageratamente a cavallo della transizione: si sperimenta un piccolo aumento di massimo e minimo tra U35 e U40 nel pre-transitorio e una piccola riduzione tra U45 e U50 nel post-transitorio. Il comportamento predominante è invece la variazione di fase tra l'angolo e lo spostamento, rappresentata dall'apertura nel ciclo nella figura 4.13 in cui abbiamo *Pitching* sull'asse delle ascisse e *Plunging* sull'asse delle ordinate. Lo spostamento, al contrario, mantiene inalterata la fase e modifica solamente il modulo massimo e minimo. In particolare aumenta di molto tra U35 e U40 mentre diminuisce di poco tra U45 e U50.

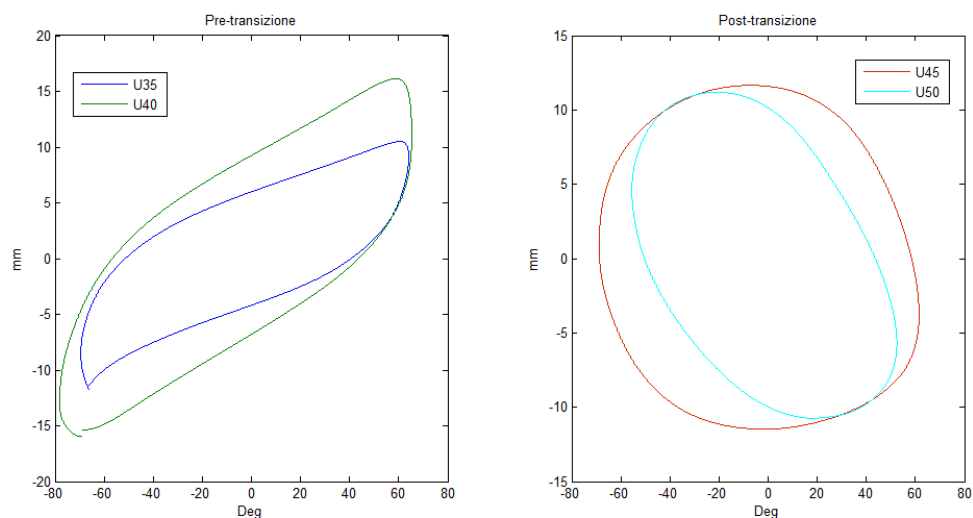


Figura 4.13 – Figura di Lissajous, relazione tra Pitch&Plunge pre e post transizione.

La relazione tra questi importanti parametri, insieme alla velocità del vento determina il regime di vorticosità e quindi la strutturazione delle forze.

In figura 4.14 è rappresentato l'andamento delle forze di Lift per diverse velocità del vento, mentre nella figura 4.14 e 4.16 è rappresentato l'andamento della stessa in funzione del *Plunging* e del *Pitching*.

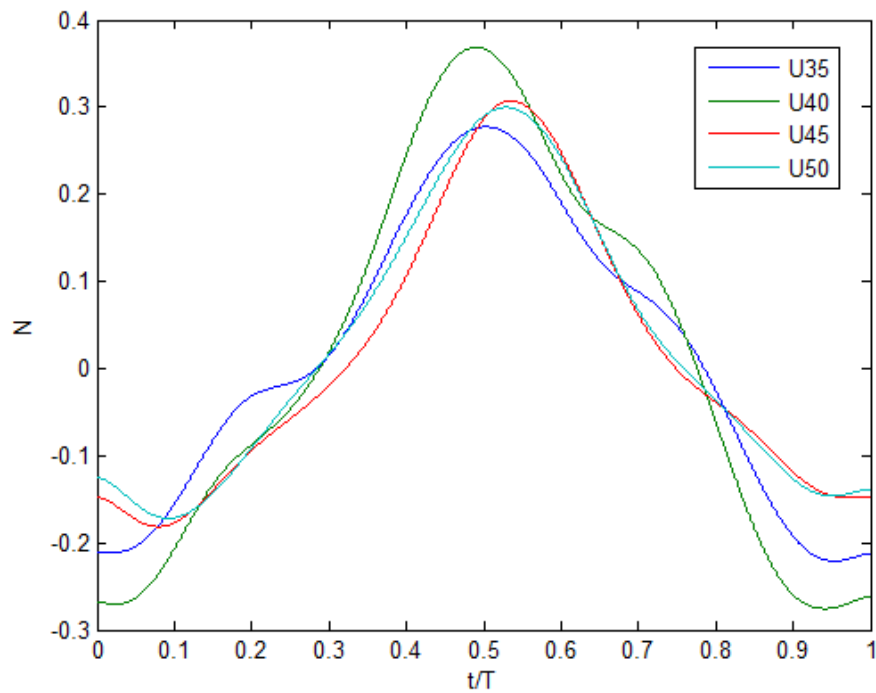


Figura 4.14 –Andamento forze di Lift nel periodo alle diverse velocità del vento.

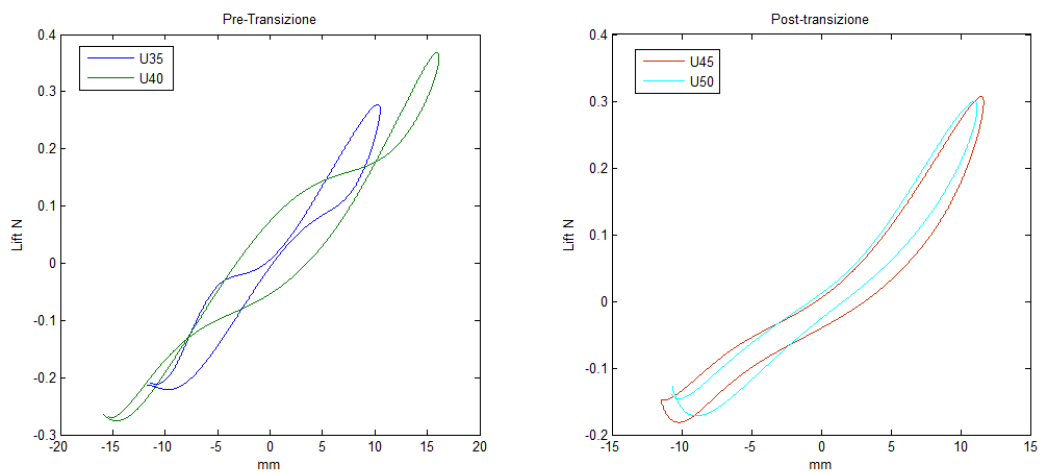


Figura 4.15 –Andamento delle forze di Lift in relazione al *Plunging*.

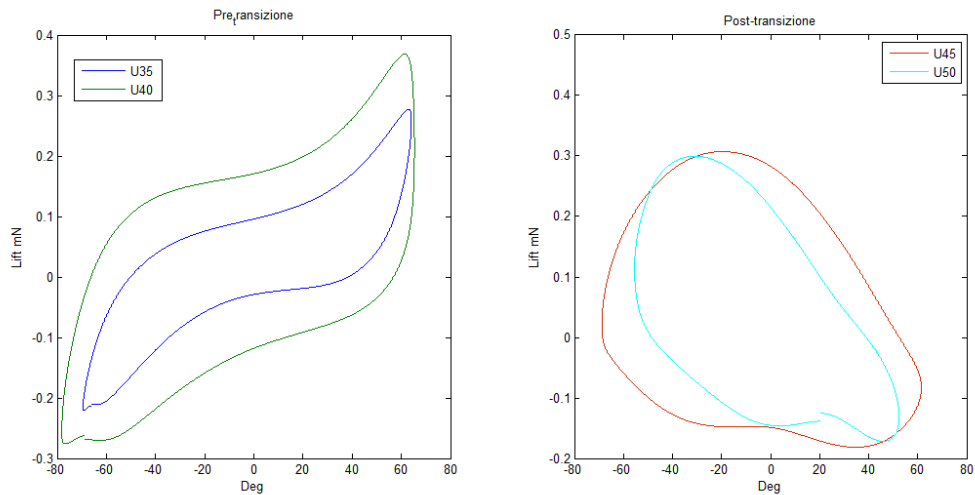


Figura 4.16 – Andamento delle forze di Lift rispetto al Pitching.

Come già anticipato precedentemente, tutte le funzioni di Lift ricavate presentano, rispetto al tempo, un tratto di crescita e un massimo, a cui segue un tratto di decrescita. E' possibile affermare che, rispetto al *Plunging*, tali forze siano fasate o circa in fase; infatti, se esse fossero in fase, un minimo o un massimo corrisponderebbe rispettivamente un minimo o un massimo dell'altro, come confermato dalla figura 4.15 per le posizioni positive (vertice alto) ma non per quelle negative che mostrano un piccolo ritardo (fase). Il massimo cresce tra U35 e U40 mentre decresce tra U45 e U50, in maniera analoga a quanto accade per l'ampiezza del ciclo.

La figura 4.16 mostra invece il legame tra Lift e *Pitching*. Per il tratto pre-transizione l'analisi risulta intuitiva: ad un valore massimo o minimo dell'angolo ne corrisponde uno del Lift e il ciclo presenta una forma di isteresi intorno allo zero. Per il tratto post-transizione si verifica una processo di arrotondamento della forza, nel quale proprio massimo non coincide più con il massimo dell'angolo ma si trova prossimo ad un valore di circa -20° , mentre per il minimo prossimo ai $+40^\circ$.

Per rendere più chiaro il risultato e per renderlo confrontabile ad eventuali prove statiche, come espresso da altri studi [13-14], si fa riferimento all'angolo efficace, definito dall'equazione 4.8.

$$\vartheta_{eff}(t) = \vartheta(t) - \tan^{-1}\left(\frac{\dot{y}(t)}{U_{vento}}\right) \quad 4.8$$

In cui: $\vartheta(t)$ è l'angolo di attacco ricavato dall'acquisizione video, $\dot{y}(t)$ è la velocità di spostamento verticale (derivata del *Plunging*), U_{vento} è la velocità del vento.

Affrontate le opportune derivazioni e svolti i calcoli, è stato ricavato il valore dell'angolo efficace nel periodo e il suo andamento. Nella figura 4.17 è possibile effettuare un confronto tra i due (in verde l'angolo calcolato, in blu l'angolo efficace) alle diverse velocità del vento.

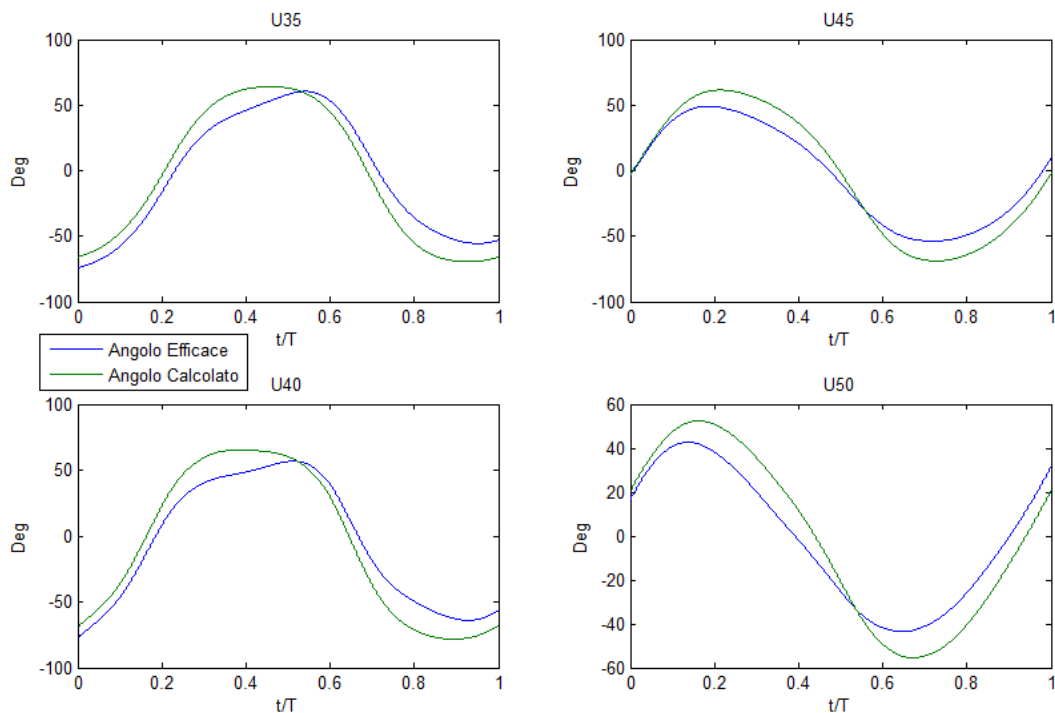


Figura 4.17 – Confronto tra angolo efficace (in blu) e angolo calcolato con l'acquisizione video (in verde).

Si può osservare una variazione non indifferente tra i due andamenti. In particolare per il comportamento in pre-transizione (U35 e U40) la funzione efficace presenta una discreta riduzione del suo valore nel tratto centrale. Per quanto riguarda il tratto post-transizione, si sperimenta un riduzione più controllata nel modulo, mentre la fase rimane pressoché invariata. Per entrambi i casi si ottiene un valore inferiore nella prima parte e superiore nella seconda, con un valore di incontro molto prossimo al mezzo periodo.

Riferendo la forza di Lift all'angolo efficace, similmente a quanto fatto precedentemente, otteniamo la figura 4.18.

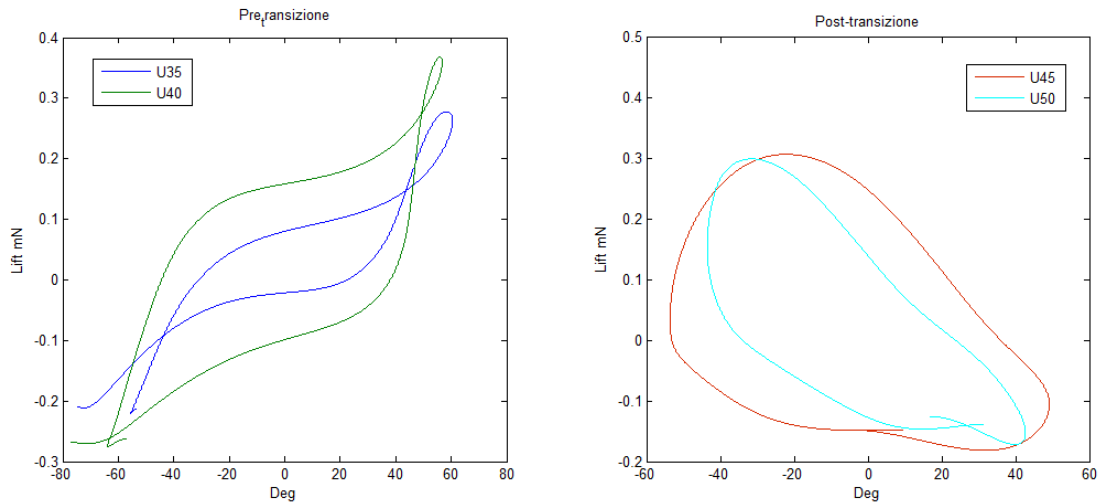


Figura 4.18 – Andamento delle forze di Lift rispetto all'angolo efficace.

Nel tratto pre-transizione è presente un fiocco nella parte superiore e un'apertura nella parte inferiore. Quest'ultima è causata da una scorretta derivazione del vettore posizione, al momento del calcolo delle velocità, vicino agli estremi del periodo e quindi nella parte inferiore del ciclo delle figure soprastanti. E' atteso un comportamento analogo a quello presente nella parte superiore. Rispetto al grafico nella figura 4.16, i massimi si spostano e diminuiscono di valore, mentre il ciclo continua ad avere un comportamento di isteresi intorno allo 0. Nel tratto post-transizione si verifica un avvicinamento tra ciclo superiore ed inferiore mentre non si verifica una variazione di legame tra angolo massimo o minimo e forza massima o minima.

Focalizzandosi sul comportamento in pre-transizione, a partire dalla figura 4.14 fino alla figura 4.18, per le curve U35 e U40, si può notare come la funzione di Lift presenti delle gobbe in fase di salita e di discesa. Esse sono evidenziate in maniera più marcata dalle figure 4.15 e 4.18, nella parte superiore (di discesa) e inferiore (di salita). Dal punto di vista del Lift rappresentano un rallentamento per il raggiungimento del massimo e del minimo. Infatti la forza possiede un suo determinato andamento, il quale viene modificato e perturbato nella zona centrale di gobba, per poi tornare indisturbato nel

tratto finale, con lo stesso andamento iniziale. La diminuzione di crescita in salita comincia con un angolo di attacco tra i -25° e -15° mentre in discesa inizia il tratto di rallentamento tra i 40° e 20° . In entrambi i casi il punto di flesso, centro della gobba, si presenta attorno allo 0 e rappresenta il punto a derivata minima, in cui il Lift cambia più lentamente. Dal punto di vista temporale, la distanza tra picco minimo di Lift e gobba è circa lo stesso rispetto a quella tra picco massimo di forza e gobba, diminuendo all'aumentare della velocità, tra U35 e U40. Il concetto di **cuscinetto fluidodinamico** unito a quello di **vortice secondario** giustifica la nascita di questa perturbazione. Il foil, presentando nella fase di discesa un angolo di attacco prossimo all'orizzontale, scendendo sposta una certa quantità di aria, modificandone la direzione e la velocità, cedendogli quindi quantità di moto (fig.4.19). Questa interazione genera una forza nel sistema, la quale, per azione-reazione, risulta diretta verso l'alto per il foil e genera una piccola porzione di portanza, che si oppone all'andamento della forza. Lo stesso discorso può essere applicato anche nella fase di salita, mentre l'ala presenta angolo negativo e compie uno spostamento verso l'alto.

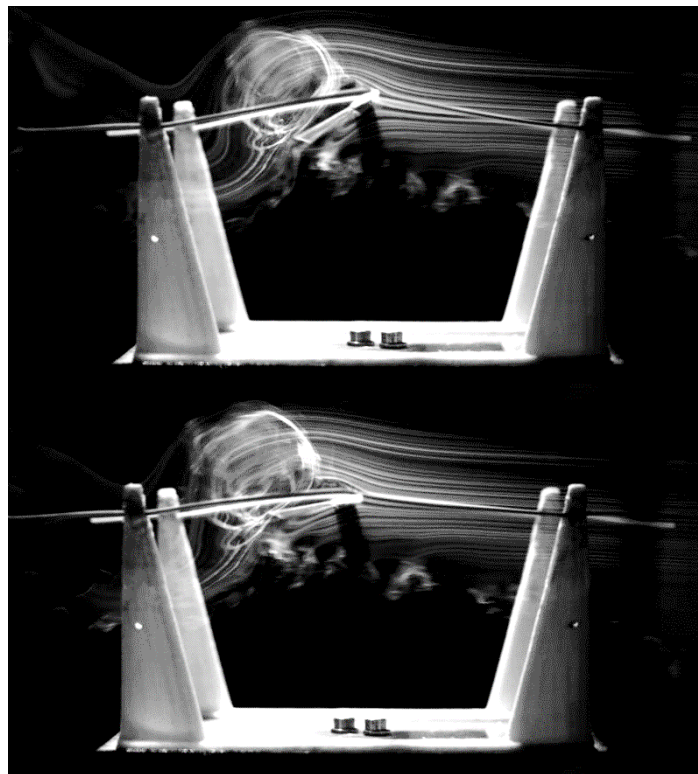


Figura 4.19 – Particolare dell'effetto di cuscinetto viscoso: l'ala sta salendo (sopra) e sposta l'aria soprastante (sotto).

L'effetto descritto prende più comunemente il nome di **massa aggiunta**, utilizzato molto spesso per la descrizione meccanica dei modelli fluidodinamici di piccoli oggetti in movimento [15-16]

E' stata notata inoltre la formazione di un piccolo vortice secondario in fase di ritorno del PPy verso il centro. Questo, generatosi ad un angolo di attacco molto ridotto rispetto al vortice principale con una velocità angolare abbastanza elevata, si crea sul dorso dell'ala ma al passaggio di angolo di attacco da positivo a negativo, si ritrova per un breve periodo nella zona ad alta pressione. L'effetto è un leggero contributo di Lift nella direzione opposta al moto che contribuisce, assieme al cuscinetto fluidodinamico, alla formazione della gobba. La creazione e lo spostamento di questo vortice può essere apprezzato nella figura 4.20.

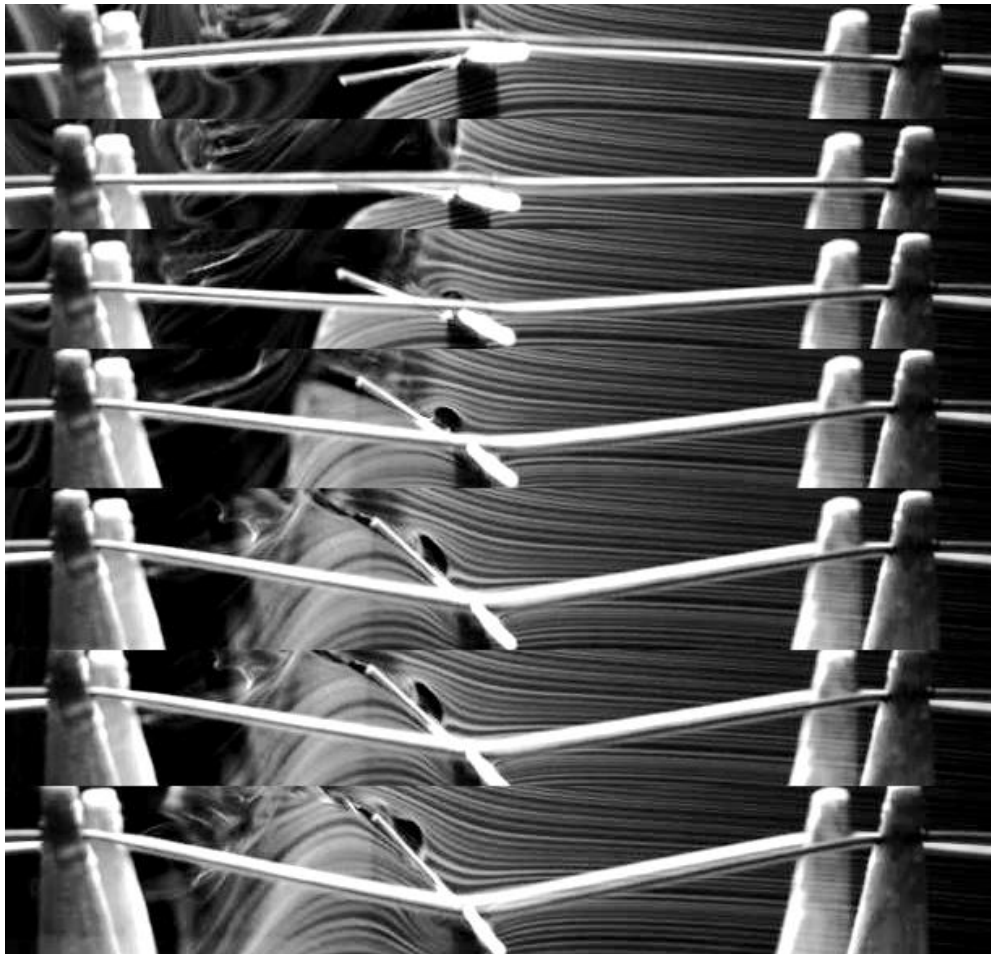


Figura 4.20 – Particolare di generazione e spostamento del vortice secondario.

Il vertice superiore ed inferiore del ciclo in figura 4.18 presenta un brusco cambiamento di forza; esso potrebbe essere attribuito al cosiddetto effetto di **stallo dinamico**: il vortice che prima era attaccato all'ala, e produceva portanza, si stacca dalla superficie e provoca una drastica riduzione di forza. Il particolare di questo fenomeno può essere apprezzato nella figura 4.21.

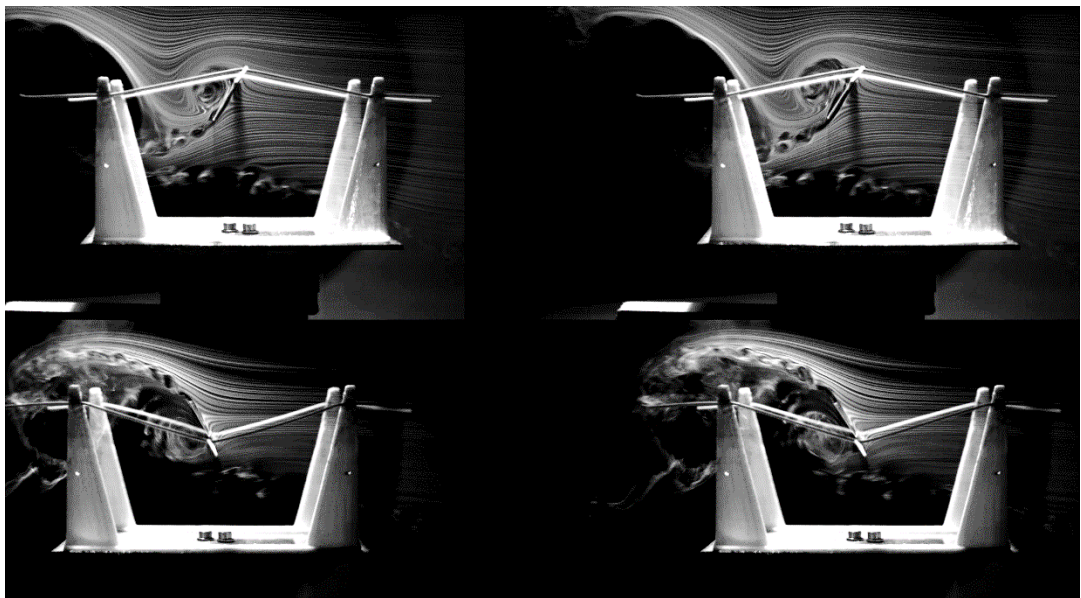


Figura 4.21 – Distacco del vortice e fenomeno di stallo dinamico nella fase di salita (sopra) e di discesa (sotto).

Il tratto post-transizione è caratterizzato da forze di Lift nel periodo strutturate in maniera molto simile a quanto visto nel pre-transizione (fig. 4.14), presenta un tratto di crescita, un massimo, comparabile in modulo con quello di pre-transizione, e un tratto di decrescita. La gobba, sperimentata nel pre-transizione, tende a ridursi all'aumentare di velocità in U45, fino a scomparire completamente in U50.

Relazionando *Pitching* a forza di Lift (fig. 4.16) è possibile notare come cambino le relazioni tra angolo massimo e forza massima. Questo discende direttamente dalla variazione di fase tra *Pitching* e *Plunging* (fig. 4.13) nel post-transizione. Partendo dallo 0 inferiore percorriamo il ciclo in senso antiorario. Nel primo tratto Il Lift diminuisce ulteriormente, probabilmente in seguito alla creazione di un vortice secondario nella

parte inferiore del foil (fig. 4.22). L'ala che possiede una forte energia cinetica rotazionale continua ad avanzare grazie alla depressione che si trova di fronte. Superata la perturbazione si trova con un elevato angolo di attacco positivo il quale induce una forte crescita di lift che la accompagna fino al punto massimo di *Displacement*. Qui sperimenta un ulteriore aumento di Lift, probabilmente indotto anch'esso da un vortice secondario (fig. 4.22), formatosi sul dorso dell'ala, precedentemente al cambio di segno dell'angolo. Successivamente al passaggio della vorticosità si ritrova ad elevato angolo di attacco negativo, che induce un grosso contributo di Lift negativo. La forza decresce e si riunisce al punto iniziale in 0.

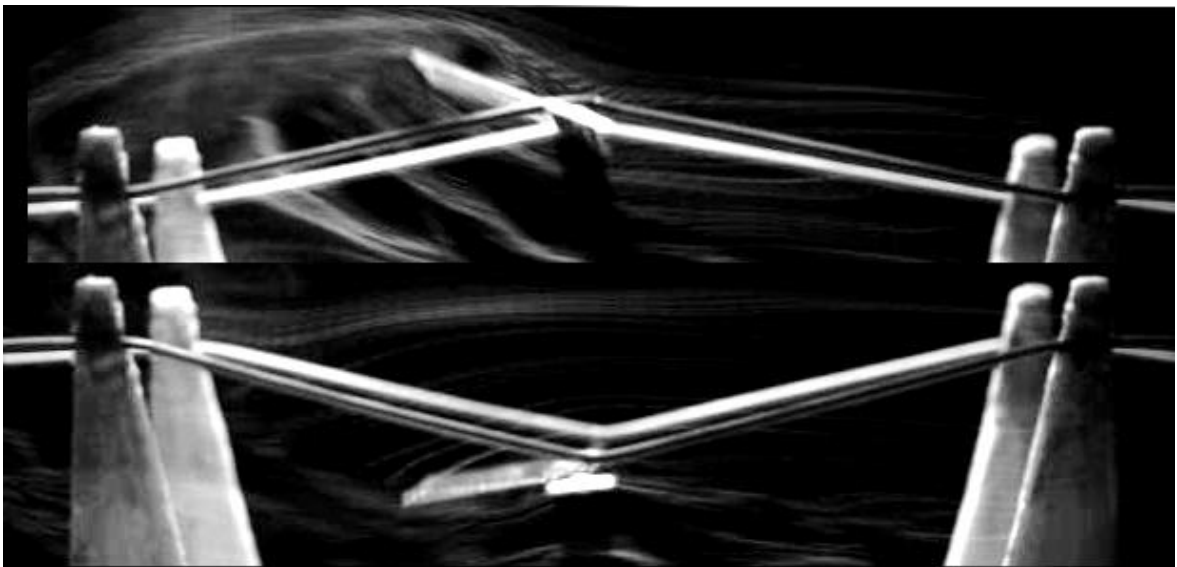


Figura 4.22 – Particolare di vortice secondario spostatosi sul fronte ad alta pressione in fase di discesa (sopra) e di salita (sotto).

Per quanto riguarda il Drag, il suo andamento nel periodo è espresso dalla figura 4.23. Come si può notare presenta un andamento molto oscillato e una frequenza di oscillazione variabile. Se si grafica l'andamento della forza in funzione dell'angolo essa risulta ancora più intricata e complessa. L'andamento sporco della funzione deriva direttamente dall'equazione 4.4: infatti la valutazione dell'accelerazione angolare risulta estremamente sensibile, essendo molto esiguo lo spostamento del PP lungo l'asse x. Un piccolo errore comporta grosse variazioni di forza elastica e il sistema diventa molto

sensibile. Purtroppo non è possibile effettuare una valutazione quantitativa della forza di Drag con i risultati ottenuti anche se è possibile effettuare qualche osservazione.

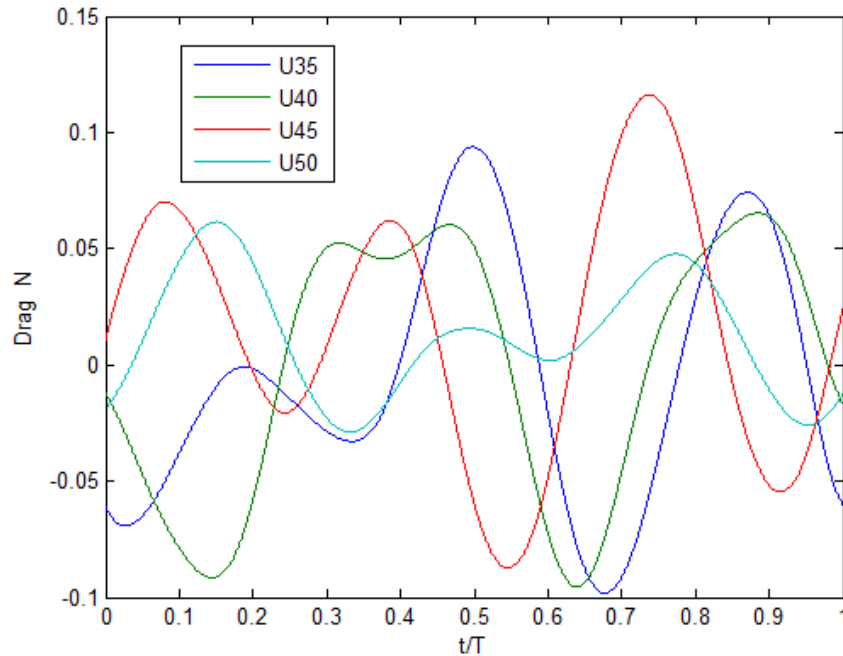


Figura 4.23 – Andamento della forza di Drag nel periodo per diverse velocità del vento.

La forza di Drag non rimane positiva in tutto il periodo, ma presenta delle zone negative, con verso della forza opposta alla direzione del fluido. Il fenomeno è più comunemente noto con il nome di *Thrust* ed è riscontrabile e coerente con recenti studi di fluidodinamica su ali battenti che presentano comportamenti di *Pitching* e *Plunging* [17-18-19]. In particolare il fenomeno è determinato da un'inversione di zone di alta e bassa pressione, le quali si trovano rispettivamente sul fronte del foil e sul retro. Esso potrebbe essere causato da una generazione di un vortice secondario prossima al cambio di segno dell'angolo di attacco, il quale lo porta dalla zona normalmente ad alta pressione, generando una forza positiva, analogamente a quanto visto per le forze di Lift.

Conclusioni e Osservazioni

In questa Tesi è stata analizzata la strutturazione delle forze fluidodinamiche generate dall'interazione tra sistema oscillante e aria, con particolare attenzione al comportamento pre e post-transizione, nei quali cambiano completamente le relazioni tra i parametri.

La forza di Lift ha restituito risultati positivi, sia per il pre che per il post-transizione, evidenziando alcuni comportamenti che potrebbero contraddistinguere le ali battenti come il concetto di massa aggiunta o di stallo dinamico.

Purtroppo la forza di Drag non ha restituito risultati elaborabili, a causa dell'elevata sensibilità dei parametri che la modellano e la definiscono, anche se comunque ha fornito alcuni spunti originali, come il concetto di *Thrust*.

La visualizzazione del fumo ha permesso la visualizzazione di grossi vortici primari, ma anche di piccoli vortici secondari, formatosi molto vicini al cambio di segno dell'angolo di attacco, il cui sviluppo e dinamica potrebbe generare sollecitazioni insolite.

Si ritiene necessaria un'analisi più approfondita delle cause che regolano il passaggio di transizione, unita ad un eventuale valutazione delle potenze istantanee scambiate tra sistema e fluido, anche per permettere di valutare una possibile condizione di ottimo per l'estrazione energetica. La ricerca sperimentale in laboratorio dovrà essere affiancata da una simulazione modellistica, al fine di consentire il legame tra parametri geometrici del modello e parametri fluidodinamici.

Ringraziamenti

Desidero ringraziare tutti coloro che mi hanno aiutato nella realizzazione della mia Tesi.

Si ringraziano

A. Bottaro e C. Boragno, miei Relatori, per avermi permesso di svolgere questa Tesi, introducendomi a questa interessante applicazione energetica.

G. Boccalero, mio Co-Relatore, per il supporto continuo e duraturo in questi mesi di ricerca e di misura, per la sua disponibilità e la sua pazienza mostrata nei miei confronti.

Ringrazio i miei genitori, Laura e Fabio, che hanno permesso il mio studio in questi anni e mia sorella Carola, che assieme a loro è stata presente in ogni momento di questo percorso, guidandomi e consigliandomi.

Ringrazio i miei parenti, in particolare tutti i nonni, i quali si sono sempre interessati per tutto quello che facevo, standomi sempre vicino.

Ringrazio Linda, per aver capito come comportarsi nel momento giusto, aiutandomi quando c'era più bisogno e per avermi aiutato a superare molti ostacoli e problemi.

Ringrazio tutti i compagni di Università con i quali ho intrapreso questo viaggio, che sono stati amici prima che compagni di banco. Ringrazio Marco, Rome, Paolo, Jacopo, Giorgio, Leonardo, Maggio, Alberto e tutti gli altri.

Ringrazio inoltre gli altri amici: Giovanni, Jachi, Francesco, Deba, Mario, Ferrar, Edo, Carlo, Alfre, Porce, Giulia, Martina, Silvia, Pietro e molti molti altri.

Bibliografia

- [1] "Internet of Things Global Standards Initiative". ITU. Retrieved 26 June 2015.
- [2] Kansal, Aman. "Power management in energy harvesting sensor networks." ACM Transactions on Embedded Computing Systems (TECS) 6.4 (2007): 32.
- [3] Qi, Y. (2010). *Nanotechnology-enabled flexible and biocompatible energy harvesting*. M.C. McAlpine.
- [4] S.R. Anton, H.A. Sodano, *A review of power harvesting using piezoelectric materials* (2003–2006). Smart Mater. Struct. 16, R1–R21 (2007)
- [5] Mitcheson, P. D., Yeatman, E. M., Rao, G. K., Holmes, A. S., and Green, T. C., "Energy Harvesting from Human and Machine Motion for Wireless Electronic Devices," Proceedings of the IEEE, Vol. 96, No. 9, 2008, pp. 1457–1486.
- [6] Kinsey, T., and Dumas, G., "Parametric Study of an Oscillating Airfoil in a Power-Extraction Regime," AIAA Journal, Vol. 46, No. 6, 2008, pp. 1318–1330.
- [7] Zhu, Q., "Optimal Frequency for Flow Energy Harvesting of a Flapping Foil," Journal of Fluid Mechanics, Vol. 675, May 2011, pp. 495–517.
- [8] "Sviluppo di un sistema di Energy Harvester mediante l'utilizzo di polimeri innovativi" G. Boccalero, 2015
- [9] *On energy harvesting from ambient vibration*, N.G. Stephen, Journal of Sound and Vibration, 293 (2006) 409–425, 2015
- [10] *Large-scale vibration energy harvesting*, L. Zuo, X. Tang, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2011
- [11] *Multi-functional dielectric elastomers artificial muscles for soft and smart machines*, T.A., McKay, I.A. Anderson, T.G. Gisby, B.M. O'Brien, E.P. Calius, Journal of Applied Physics 112(4), 041101, 2012
- [12] "Elastically bounded flapping wing for energy harvesting" C. Boragno R. Festa A. Mazzino June 2012
- [13] "Experimental study of pitching and plunging airfoils at low Reynolds numbers" Yeon Sik Baik, Luis P. Bernal November 2012
- [14] *Unsteady force generation and vortex dynamics of pitching and plunging aerofoils*, Yeon Sik Baik, L.P. Bernal, K. Granlund, M.V.Ol., August 2012
- [15] Yuanqi, Li, et al. "Added-mass estimation of flat membranes vibrating in still air." *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 99.8 (2011): 815-824.

- [16] Argentina, Médéric, and L. Mahadevan. "Fluid-flow-induced flutter of a flag." *Proceedings of the National academy of Sciences of the United States of America* 102.6 (2005): 1829-1834.
- [17] Tuncer, Ismail H., and Mustafa Kaya. "Optimization of flapping airfoils for maximum thrust and propulsive efficiency." *AIAA journal* 43.11 (2005): 2329-2336.
- [18] Mackowski, A. W., and C. H. K. Williamson. "Direct measurement of thrust and efficiency of an airfoil undergoing pure pitching." *Journal of Fluid Mechanics* 765 (2015): 524-543.
- [19] Moriche, M., O. Flores, and M. García-Villalba. "Generation of thrust and lift with airfoils in plunging and pitching motion." *Journal of Physics: Conference Series*. Vol. 574. No. 1. IOP Publishing, 2015.