

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI GENOVA

SCUOLA POLITECNICA

DIME

**Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Energetica,
Gestionale e dei Trasporti**



**TESI DI LAUREA
IN
INGEGNERIA MECCANICA**

**Due metodi sperimentali per la visualizzazione di moti
fluidi**

Relatori:

Chiar.^{mi} Proff. Alessandro Bottaro, Corrado Boragno

Allievi:

Rubens Dellepiane,

Francesco Marcucci

Luglio 2021

Due metodi sperimentali per la visualizzazione di moti fluidi

Sommario

L'obiettivo di questa tesi è quello di fornire una panoramica su un metodo ottico di visualizzazione di un fluido aeriforme, il metodo Schlieren. In particolare, si sono studiate due varianti di questo metodo. La prima, permette di valutare visivamente le variazioni di densità di un mezzo fluido trasparente, sfruttando la variazione di indice di rifrazione che ne consegue e restituendo il tutto tramite una camera che rileva parte dei raggi deviati dal fenomeno che presenta il gradiente di densità, dopo che essi sono stati riflessi da uno specchio concavo posto a due volte la sua distanza focale rispetto alla sorgente dei raggi stessi. La seconda metodica permette di arrivare allo stesso fine partendo da un principio differente: non si ha più necessità di uno specchio concavo, bensì di uno sfondo di riferimento, il quale viene catturato dalla fotocamera senza presenza di variazioni di densità e successivamente in presenza di esse. Quindi, facendo una cross-correlazione o sottrazione via software tra le due immagini, si riesce a risalire al gradiente di densità che ha causato la differenza tra le due, e dunque a visualizzare il fluido che lo conteneva. Pur essendo di più facile implementazione, questa seconda variante risulta meno sensibile e più difficile da configurare.

Two experimental methods to visualize fluid motions

Abstract

The goal of this thesis is to provide an overview of an optical method to visualize the flow of a gas, the Schlieren method. In particular, two variants of this method have been studied. The first allows to visually evaluate the density variations of a transparent fluid medium, exploiting the consequent variation of refractive index and showing the whole phenomenon through a camera that detects part of the rays deviated by the phenomenon that presents the density gradient, after they have been reflected by a concave mirror placed at twice its focal length from the source of the rays themselves. The second approach allows to reach the same goal starting from a different principle: the mirror is replaced by a reference background, which is captured by the camera without the density variations and subsequently with the phenomenon inserted. Therefore, by making cross-correlation or subtraction via software between the two images, it is possible to trace the density gradient that caused the difference between the two images, and to visualize the fluid that contained it. Although this second method is easier to implement, it is also less sensitive and more difficult to work with.

Indice

Sommario	I
Abstract	II
1 – Introduzione	1
1.1 – Storia	1
1.2 - Basi scientifiche del fenomeno	3
1.3 - Sviluppi moderni del metodo Schlieren e altre tecniche	5
2 - Fotografia Schlieren	9
2.1 - Set-up sperimentale	9
2.2 - Problemi di sdoppiamento dell'immagine	12
3 - Applicazioni sperimentali	16
3.1 - Primi esperimenti e rilevazione dei vortici di Von Karman	16
3.1.1 - Vortici di Von Karman	17
3.1.2 - Comportamento del moto dietro una paletta e generazione di un vortice e di una scia intorno a un profilo oscillante	23
4 – BOS	28
4.1 – Introduzione metodologia BOS	28
4.2 – Set-up sperimentale	28
4.3 – Analisi sperimentale	32
5 – Conclusioni	35
Bibliografia	37

1. Introduzione

1.1. Storia

Il metodo Schlieren - dal tedesco “schliere”, letteralmente “striatura”, “striscia” - è un metodo ottico di visualizzazione di fluidi trasparenti, che sfrutta le variazioni dell’indice di rifrazione del mezzo in analisi per rendere visibili sotto forma di ombreggiature le disomogeneità di quest’ultimo.

I primi studi in merito risalgono al XVII secolo e sono attribuibili allo scienziato inglese Robert Hooke. Egli implementò infatti una tecnica sperimentale molto simile al metodo oggetto di questa tesi: utilizzando due candele (una come fonte luminosa, l’altra come causa di perturbazione dell’aria, e quindi fenomeno da studiare) e due lenti poste in successione, dimostrò che era possibile vedere una variazione di densità in un mezzo trasparente, grazie alla deviazione dei raggi luminosi che lo attraversano [1], [2].

Sempre nel Seicento, l’astronomo olandese Christiaan Huygens utilizzò per primo un metodo simile a quello proposto da Hooke, per individuare disomogeneità nelle lenti dei telescopi: una fonte di luce veniva direzionata verso la lente in analisi e, a seconda delle variazioni di luminosità in uscita da quest’ultima, se ne valutava la bontà, in funzione della presenza di venature o altre non-uniformità.

Due secoli dopo, il metodo Schlieren prese la forma odierna principalmente grazie a due studiosi: Leon Foucault e August Toepler.

Il primo introdusse l’utilizzo di una lametta per tagliare parte del flusso luminoso che convergeva al punto focale di uno specchio concavo o di due lenti poste in successione, in modo da poter bloccare parte dei raggi non rifratti dal mezzo in analisi, e mantenere solo alcuni raggi non rifratti, insieme a quelli rifratti non eliminati dalla lametta, che permettono una visione in “chiaro-scuro” delle zone a gradiente di densità non nullo. Il secondo invece, riprendendo gli studi a lui precedenti, consacrò il metodo Schlieren come tecnica per l’osservazione di moti fluidi, e non più come tecnica per analizzare mezzi solidi trasparenti (lenti); in particolare, egli cercò di esaminare visivamente come le onde di pressione si trasmettono in un aeriforme. È interessante anche dire che i suoi studi furono utilizzati e rivisti da due nomi noti della fluidodinamica del tempo, vale a dire Ernst Mach e Ludwig Prandtl [1].

Nel XX secolo infine, lo studio dell’aerodinamica divenne cruciale, soprattutto in ambito aeronautico-militare, ed è in questo frangente che il tedesco Hubert Schardin si distinse per una particolare implementazione della tecnica Schlieren. Egli infatti introdusse la possibilità di avere una resa a colori delle zone a diversa densità, grazie all’utilizzo di un prisma e di un filtro reticolare ad alternanza di zone trasparenti e opache, in sostituzione della lametta [3]. Hooke, e più propriamente lo stesso Schardin, possono inoltre essere visti come gli “inventori” di un metodo di visualizzazione oggi largamente utilizzato e sviluppato, detto “background-oriented-Schlieren” che non richiede la presenza di specchi concavi o lenti in successione, ed è per questo implementabile anche per misurazioni all’aperto su oggetti che vanno dalle dimensioni di un proiettile, a quelle di un grande velivolo. Per non appesantire troppo la trattazione iniziale, ci limiteremo a una spiegazione superficiale del BOS (background-oriented-Schlieren), che verrà poi approfondito a valle della trattazione dello Schlieren classico. Il principio di funzionamento di questa tecnica è dato dal confronto tra due immagini che ritraggono lo stesso sfondo, prima e dopo che tra la camera e lo sfondo

sia stato posto il mezzo da studiare: grazie alle variazioni di densità introdotte da questo, la luce che lo attraversa viene rifratta e dunque deviata, con la conseguenza che i punti sullo sfondo che sono rimasti, ovviamente, fermi, risultino spostati nelle due foto; misurando quindi la distanza tra due punti catturati dalle due foto -una con e una senza variazione d'indice di rifrazione- che corrispondono a un unico punto dello sfondo, si può risalire al gradiente di densità che ha causato la rifrazione. In (Fig. 1.1) è raffigurato uno schema di sistema BOS.

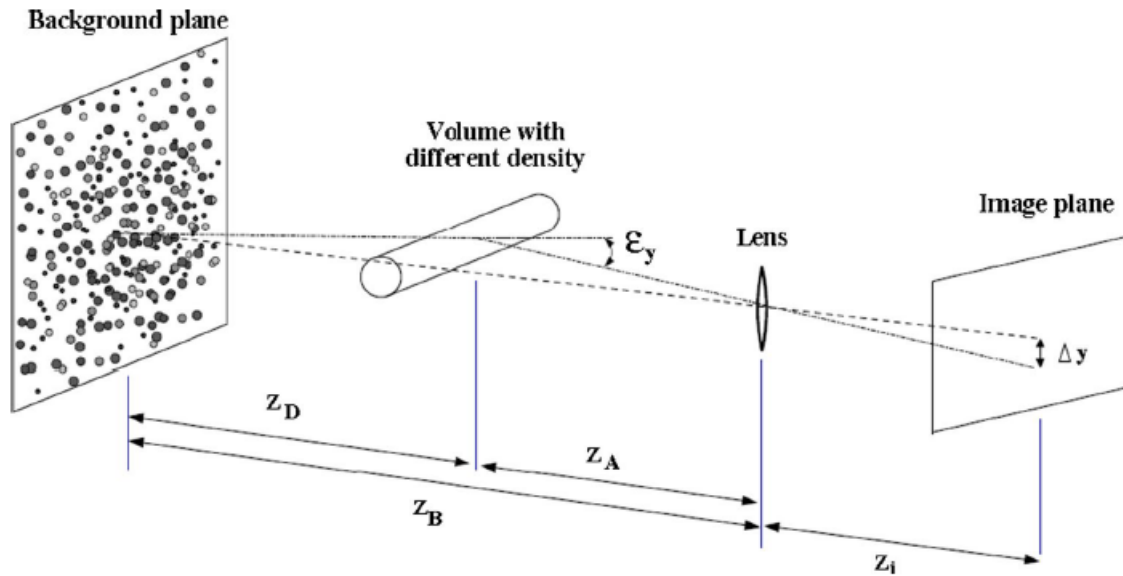


Fig. 1.1 – Schema BOS

Analizzando la figura soprastante si può arrivare a una formulazione per lo spostamento verticale Δy , come riportato in [4], che risulta:

$$\Delta y = Z_D M \varepsilon_y \quad (1.1)$$

dove:

Δy = spostamento dell'immagine lungo y

Z_D = distanza tra il background e il gradiente di densità

$M = Z_i / Z_B$ ingrandimento dell'immagine sullo sfondo

$\varepsilon_y = \frac{1}{n_0} \int \frac{\partial n}{\partial y} dz$, deflessione della luce nella direzione y, ottenuta integrando lungo la linea di vista di z.

n_0 = indice di rifrazione di riferimento

A partire da quanto detto e considerando che $\frac{1}{f} = \frac{1}{z_i} + \frac{1}{z_b}$, si può riscrivere lo spostamento dell'immagine come:

$$\Delta y = f \left(\frac{Z_D}{Z_D + Z_A - f} \right) \varepsilon_y \quad (1.2)$$

Con:

f = lunghezza focale della lente della camera

Z_A = distanza tra la lente e il gradiente di densità

Quest'ultima equazione ci mostra che si possono ottenere grandi spostamenti dell'immagine, corrispondenti ad un aumento di sensibilità della tecnica, aumentando Z_D e diminuendo Z_A . La diminuzione di Z_A però ci porta a una perdita di nitidezza, in quanto nel BOS per ottenere il massimo contrasto, si deve mettere a fuoco sul background e, maggiore è la distanza di questo dal fenomeno, più grande sarà la perdita di nitidezza. Una possibile soluzione in questo caso è utilizzare dei diaframmi molto stretti che ci permettono di avere un campo di messa a fuoco di maggiori dimensioni, comportando però una perdita di luminosità, risolubile tramite l'uso di fonti di luce più intense. Il sistema BOS risulta quindi di più facile messa a punto rispetto a quello Schlieren, ma allo stesso tempo necessita di svariati accorgimenti per poter ottenere delle immagini di qualità che possano risultare utili anche per un'analisi quantitativa del moto fluido che si desidera studiare.

1.2. Basi scientifiche del fenomeno

Come si è detto in precedenza, con il metodo Schlieren si intendono visualizzare le disomogeneità in un mezzo trasparente, normalmente non visibili a occhio nudo, mediante un sistema che rilevi le variazioni dell'indice di rifrazione n , conseguenti a zone a diversa densità. Non è infatti n in sé a causare rifrazione, bensì il suo gradiente in una o più direzioni [1].

Esistono due leggi che legano la deviazione della luce alla densità del mezzo attraversato da questa; la prima, detta legge di Gladstone-Dale, risponde a questa equazione:

$$n-1 = K \rho \quad (1.3)$$

dove:

$n = c/v$ = indice di rifrazione, con “ c ” velocità della luce nel vuoto e “ v ” velocità della luce nel mezzo in analisi

K = costante di Gladstone-Dale [m^3/kg], dipendente dalla lunghezza d'onda della radiazione luminosa, dal fluido attraversato e dalle condizioni ambientali

ρ = densità [kg/m^3]

Da questa legge si vede come l'indice di rifrazione n e la densità ρ siano legate linearmente. La seconda legge è invece quella di Snell, sintetizzabile così:

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{\sin \beta}{\sin \alpha} \quad (1.4)$$

dove:

n_1 = indice di rifrazione nel mezzo 1

n_2 = indice di rifrazione nel mezzo 2

α = angolo compreso tra la direzione del raggio luminoso nel mezzo 1 e la perpendicolare all'interfaccia tra 1 e 2, anche detto “angolo d'incidenza”

β = angolo compreso tra la direzione del raggio luminoso deviato nel mezzo 2 e la perpendicolare all'interfaccia tra 1 e 2, o più brevemente “angolo di rifrazione”.

Tale legge si capisce meglio con l'ausilio della *Fig. 1.2* tratta da [5].

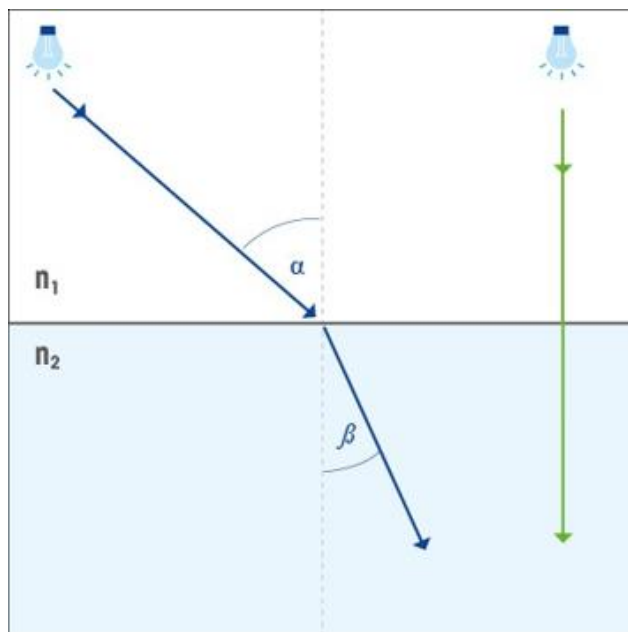


Fig. 1.2 – Rappresentazione grafica delle grandezze caratterizzanti la legge di Snell

È immediato capire che, noti i due indici n_1 ed n_2 e noto uno dei due angoli, non è difficile calcolare di quanto il fascio luminoso venga deviato passando dal mezzo 1 al mezzo 2. Per quanto riguarda il valore corretto da attribuire agli indici, online si trovano con facilità tabulati per le sostanze più comuni. In *Tab. 1.1* se ne allega un esempio.

Tab. 1.1 – Indici di rifrazione delle sostanze più comuni

Mezzo	Indice di rifrazione [adimensionale]	Velocità di propagazione della luce [m/s]
Vuoto	1	$3 \cdot 10^8$
Acqua	1.33	$2.26 \cdot 10^8$
Aria	1.00029	$2.999 \cdot 10^8$
Vetro	1.5-1.9	$2 \cdot 10^8$
Ghiaccio	1.31	$2.29 \cdot 10^8$
Silicio	3.4	$0.88 \cdot 10^8$
Quarzo	1.51	$1.99 \cdot 10^8$
Diamante	2.417	$1.24 \cdot 10^8$

1.3. Sviluppi moderni del metodo Schlieren e altre tecniche

L'apporto della tecnologia moderna, e soprattutto della digitalizzazione, ha portato a impieghi sempre più vasti e vantaggiosi delle tecniche ottiche. Infatti, la possibilità di post-produrre le immagini ottenute con metodi tradizionali, aggiungendovi tratti distintivi che le rendano qualitativamente e quantitativamente più significative, ha giocato un ruolo fondamentale nella scienza e nella meccanica degli ultimi decenni. Questo fattore, abbinato alla naturale non-intrusività delle tecniche ottiche, ha permesso che anche una metodologia semplice e piuttosto antiquata come quella Schlieren continuasse ad essere frequentemente impiegata nei laboratori e nei centri di ricerca [3], [6].

Due dei moderni sviluppi oggi più utilizzati sono il già citato BOS e lo Schlieren a colori, brevemente trattati nel primo paragrafo di questo capitolo, quando si parlava del loro ideatore Hubert Schardin. Entrambi furono poco utilizzati nell'era pre-digitale, a causa della scarsità di informazioni aggiuntive che potevano portare, ma grazie all'odierna possibilità di rielaborare finemente grandi quantità di dati, da essi si possono trarre importanti deduzioni di tipo quantitativo, ad esempio correlando una fascia di colori dello spettro visibile, a una certa densità del mezzo fluido in analisi, tramite software come MATLAB et similia.

Un'altra tecnica ottica affine allo Schlieren, e forse di ancor più semplice comprensione e utilizzo, è l'ombrografia (dall'inglese Shadowgraphy), la quale studia il gradiente di densità di un fluido trasparente, osservando quanto e come dei raggi paralleli che lo attraversano vengono deviati rispetto alla direzione che seguirebbero se questo fosse assente, creando "ombre" su uno schermo. Si tratta dello stesso fenomeno che tutti noi avremo sperimentato quando, in un giorno estivo particolarmente caldo, avremo notato sull'asfalto di una strada, o su superfici analoghe, piccole zone d'ombra conformate come delle striature, muoversi ad intermittenza, anche se nella porzione di cielo soprastante, nella direzione di proiezione dell'ombra, non vi erano ostruzioni visibili a causarle: si trattava semplicemente di un volume d'aria immediatamente soprastante l'asfalto che, essendo fortemente riscaldato da quest'ultimo, era caratterizzato da un notevole gradiente di densità, e dunque, deviando i raggi solari rispetto alla direzione che questi avevano nelle zone circostanti, creava quelle "zebrature" più scure sul suolo. Anche questa tecnica, grazie all'implementazione di schermi retroriflettenti e videocamere estremamente rapide, ha visto una sua moderna evoluzione, essendo di frequente impiegata, come il BOS, anche in studi all'aperto e su grossi volumi.

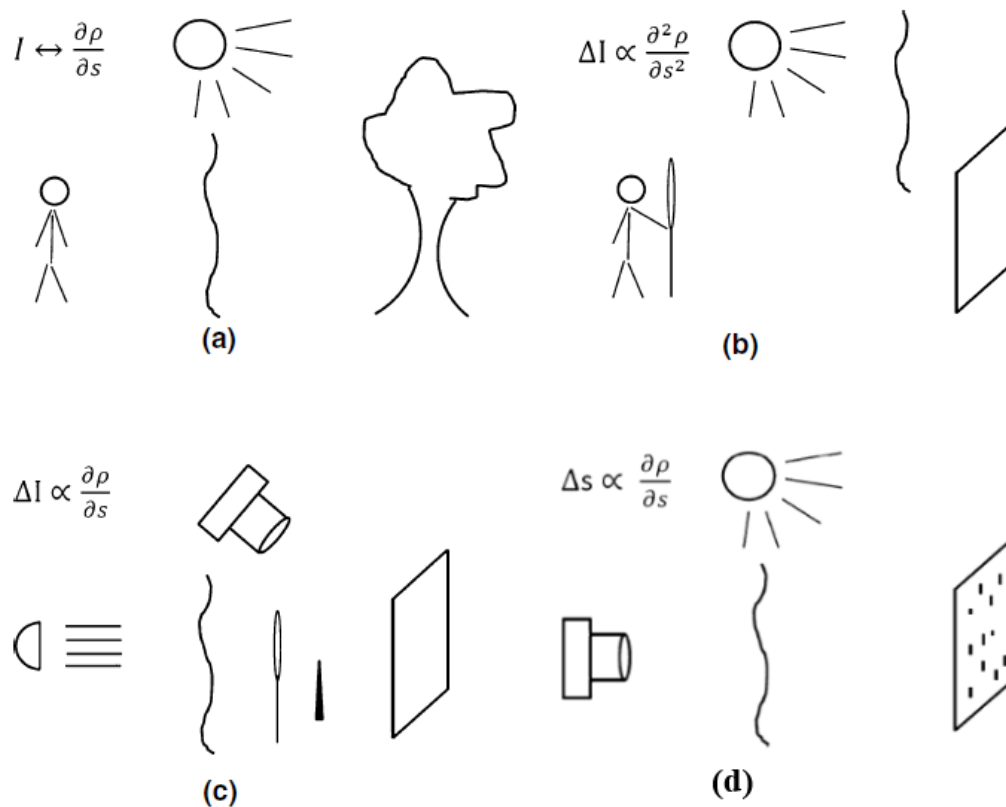


Fig 1.3 – Diverse tipologie di analisi delle variazioni di indice di rifrazione

Tutte le tipologie di visualizzazione finora elencate vanno ad analizzare sempre delle variazioni di indice di rifrazione, ma con delle differenze legate al set-up sperimentale che si sta utilizzando, come riportato in Fig. 1.3, tratta da [4].

In (a) si può vedere il fenomeno del cosiddetto “miraggio”, il quale si verifica solitamente a causa del sole molto intenso e nel quale l’intensità luminosa è proporzionale alla derivata prima della densità dell’aria. L’immagine (b) riporta invece ciò che accade nel caso dell’ombrografia, nella quale le variazioni di intensità luminosa ΔI risultano proporzionali alla derivata seconda della densità; in (c) troviamo lo Schlieren classico dove le ΔI sono proporzionali alla derivata prima della densità. Infine in (d) troviamo il metodo di più recente sviluppo, ossia il BOS, nel quale lo spostamento dei punti sul background Δs risulta proporzionale, come per lo Schlieren classico, alla derivata prima della densità dell’aria.

A titolo esemplificativo si allegano alcune fotografie (Fig. 1.3-1.6) reperite in rete, su diverse sperimentazioni effettuate su oggetti di varie dimensioni mediante le tecniche ottiche sin qui analizzate.

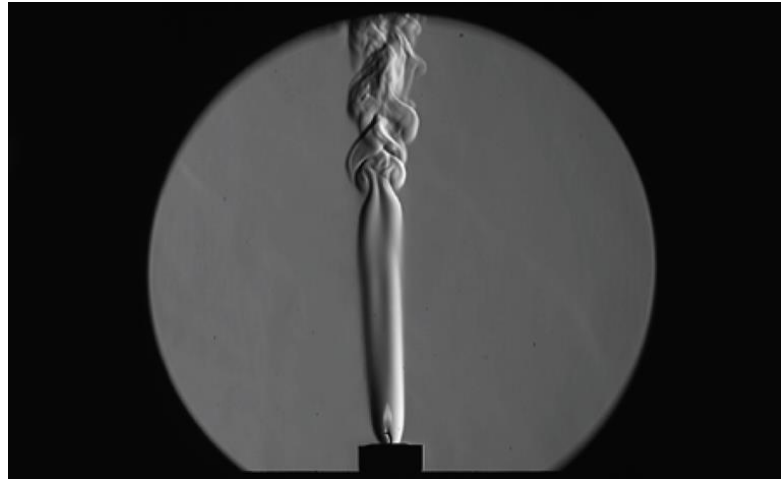


Fig. 1.3-Perturbazione termica sopra una candela, catturata con metodo Schlieren

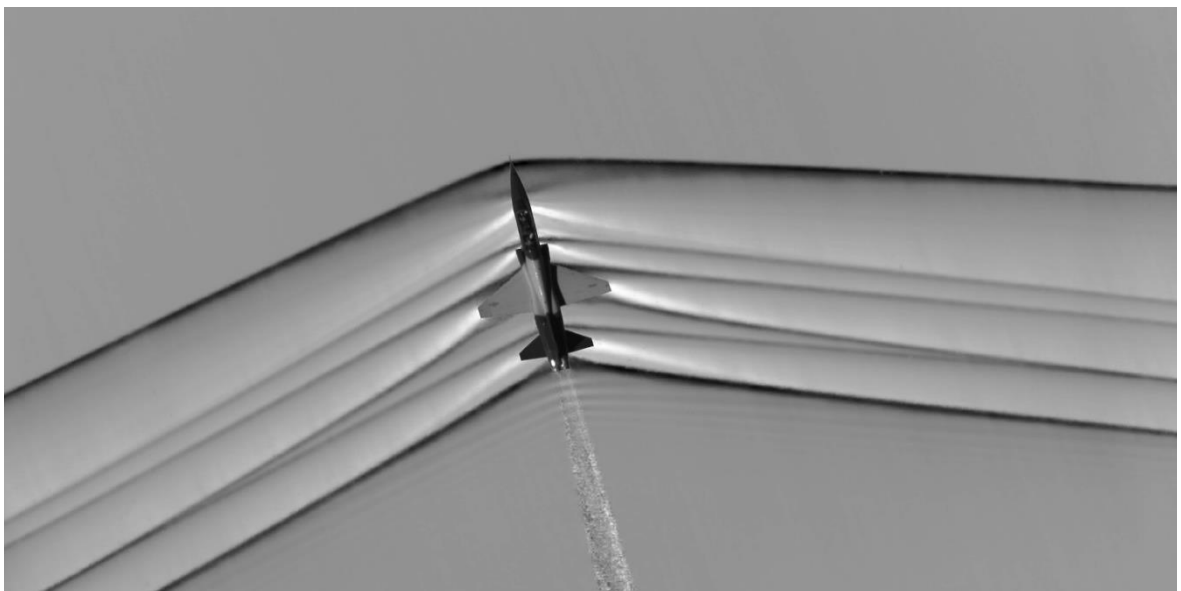


Fig. 1.4 – Onda di pressione intorno a un velivolo T38C, catturata con BOS

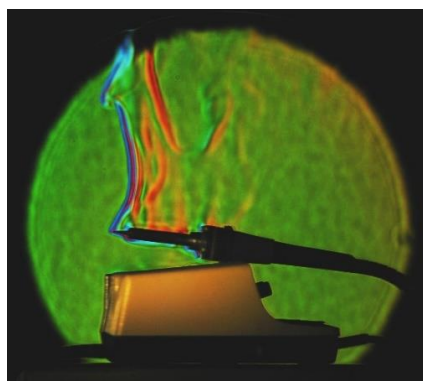


Fig. 1.5 – Gradiente di densità sopra la punta calda di un saldatore elettrico, visualizzato con Schlieren a colori

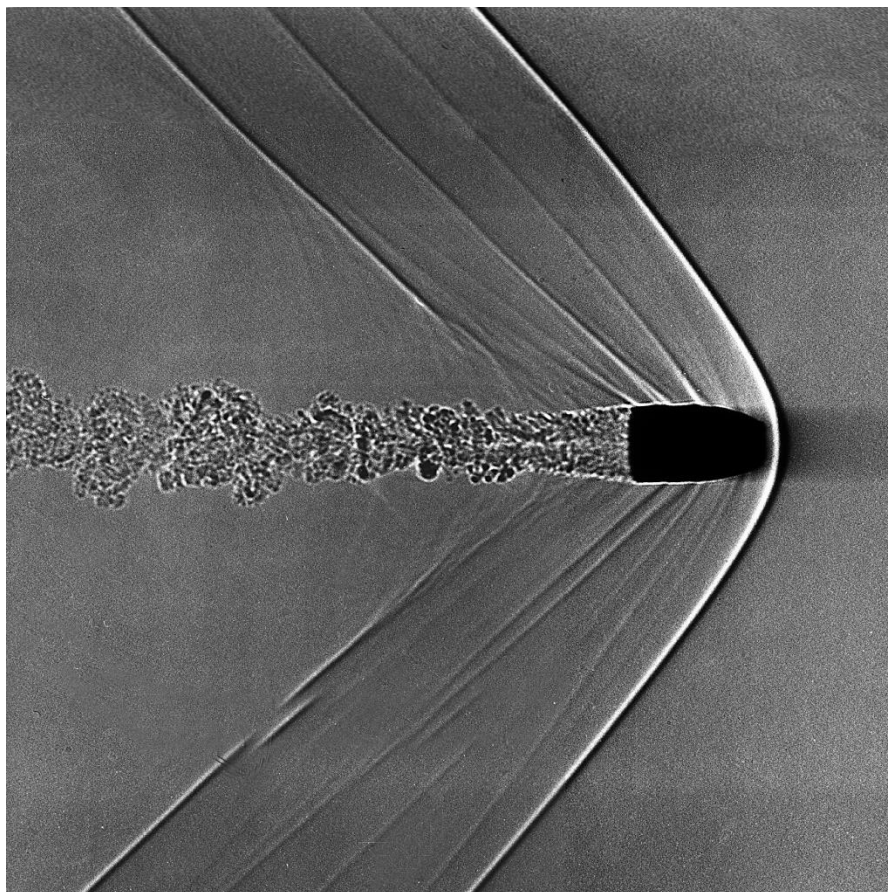


Fig. 1.6 – Onda di pressione attorno a un proiettile, shadowgraphy

Noti ora la storia, la teoria del fenomeno e alcuni suoi moderni sviluppi, si affronterà nel seguito l'esposizione dell'esperienza di laboratorio effettuata presso il DIFI all'Università degli Studi di Genova.

2. Fotografia Schlieren

2.1 Set-up sperimentale

La visualizzazione delle variazioni di indice di rifrazione dell'aria può essere determinata facendo uso di diversi set-up; tutti presentano delle caratteristiche comuni, fondamentali per la riuscita dell'esperimento. È necessaria la presenza di una sorgente luminosa puntiforme, di uno specchio concavo, di un blade o di un filtro e di una videocamera per riuscire a visualizzare e catturare il fenomeno. Solitamente si usa una configurazione rettilinea che vede camera, blade e sorgente puntiforme praticamente affiancati e collocati a distanza doppia rispetto alla distanza focale dello specchio concavo dallo stesso, come visibile nella Fig. 2.1.

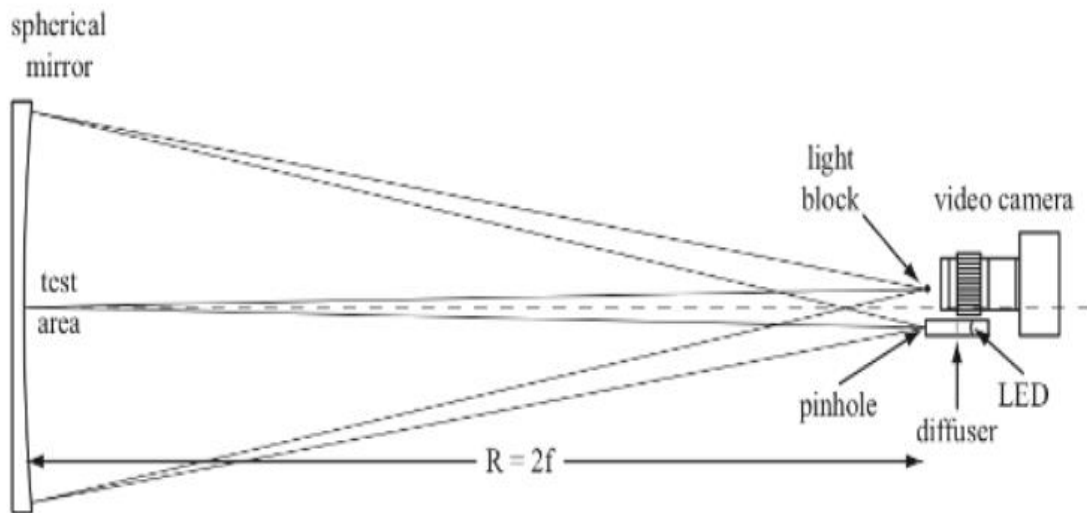


Fig. 2.1 – Schema di base per realizzazione fotografia Schlieren

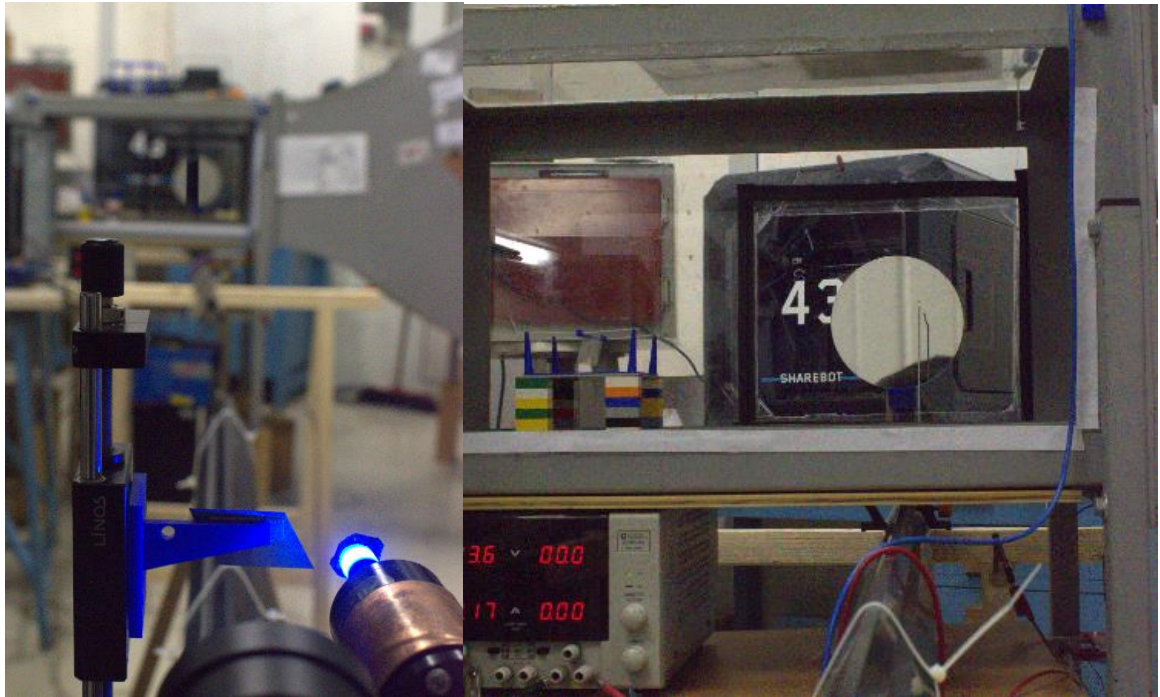


Fig. 2.2 – Set-up laboratorio DIFI. A sinistra: particolare di blade, led e obiettivo; a destra, particolare della galleria del vento e dello specchio concavo

Nel nostro caso, inizialmente, per riuscire a rendere la configurazione più compatta e migliorare la risoluzione dell'immagine, che risulti raddoppiata in dimensioni, si era deciso di utilizzare un set-up alternativo che impiegasse uno specchio piano in aggiunta al già presente specchio concavo.

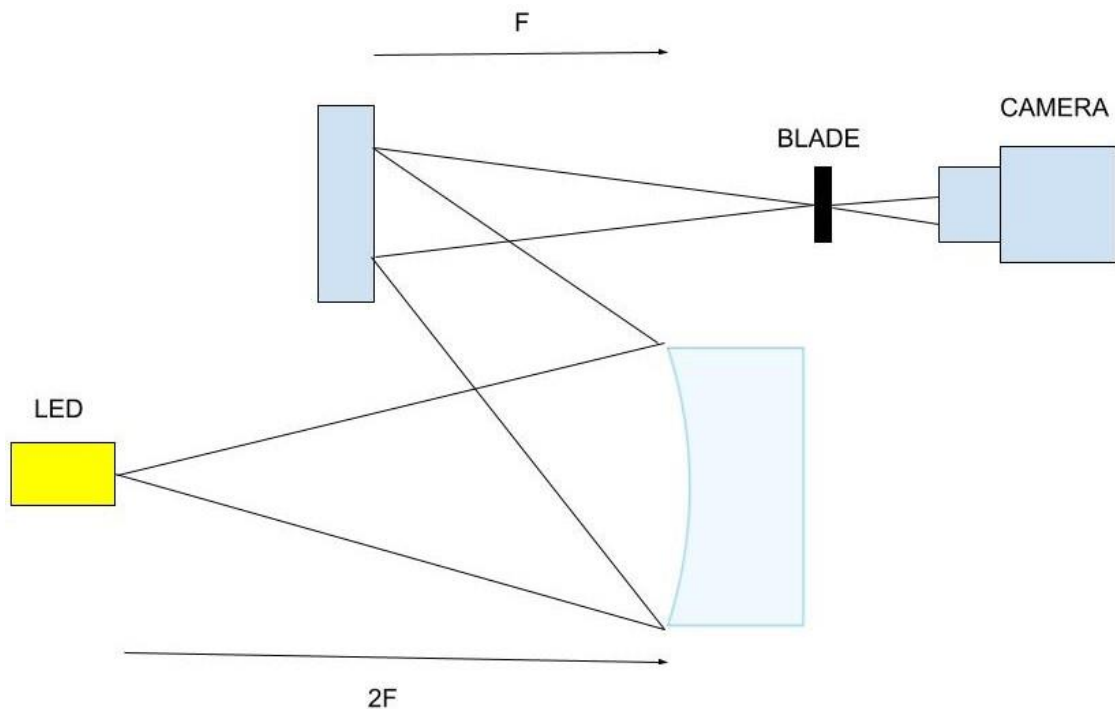


Fig 2.3 – Schema di funzionamento con specchio piano

Il primo elemento è una sorgente luminosa LED, la quale viene opportunamente convogliata in modo tale da poter essere considerata puntiforme; dalla sua origine parte un cono di luce che viene direzionato verso lo specchio concavo. Esso si infrange sullo specchio concavo opportunamente posizionato a due volte la distanza focale ($2f$) dello stesso e viene convogliato in direzione dello specchio piano, il quale è stato collocato, nel nostro caso, a una volta la distanza focale ($1f$) dello specchio concavo dalla camera; da qui, il cono di luce convergente originatosi in corrispondenza del concavo, continua a rimpicciolirsi percorrendo un'altra distanza focale ($1f$) fino ad essere perfettamente puntiforme in corrispondenza del blade. Superato il blade, il cono inizia a riallargarsi e viene catturato dall'ottica della videocamera, necessaria per visualizzare il fenomeno. Questa configurazione consente di avere l'immagine prodotta dallo specchio concavo non a $2f$, come nella classica soluzione rettilinea ma, avendo introdotto lo specchio piano, a $1f$ dall'ottica della videocamera, guadagnando molta risoluzione sul fenomeno osservato.

Discusso ora in maniera generale il set-up dell'esperimento, si procede nell'analisi accurata di ogni componente con il rispettivo funzionamento:

- 1) LED: si occupa di emettere il primo cono di luce divergente, che viene opportunamente direzionato verso lo specchio concavo. La sorgente luminosa è fondamentale per una buona visualizzazione del fenomeno. Essa deve infatti risultare il più possibile assimilabile a una sorgente puntiforme e allo stesso tempo essere sufficientemente luminosa per permettere alla luce di raggiungere in maniera consistente l'obiettivo della videocamera, permettendo di ottenere un maggiore contrasto e una sensibilità più elevata.
- 2) Specchio concavo: è il componente essenziale che consente di percepire le variazioni di indice di rifrazione. Il fenomeno da studiare deve essere posizionato davanti ad esso: l'aria modifica il suo indice di rifrazione tutte le volte che è presente una variazione di temperatura, in conseguenza della quale si viene a modificare anche la sua densità; quando il mezzo trasparente viene attraversato da un fascio di luce incidente, questo viene deviato e non risulta più rettilineo, seguendo quanto affermato in precedenza dalla legge di Snell. La conformazione dello specchio concavo ci permette, per sua natura e grazie al blade, di visualizzare queste deviazioni, che vengono carpite dalla videocamera come bande di diversa intensità luminosa.
- 3) Specchio piano: solitamente non è presente nelle configurazioni per la fotografia Schlieren; è stato da noi introdotto per poter diminuire la distanza tra la videocamera e la zona dove è possibile visualizzare il fenomeno. Su di esso vengono riflessi i raggi incidenti provenienti dallo specchio concavo, che sono a loro volta direzionati verso il blade e la camera.
- 4) Blade o filtro: è l'altro elemento fondamentale, insieme allo specchio concavo, che permette di visualizzare le variazioni di indice di rifrazione. Infatti, se posizionato in corrispondenza del fuoco del concavo, si occupa di impedire a parte dei raggi riflessi di convergere all'interno della camera. Svolge quindi la funzione di "tagliare" la parte di raggi che non sono stati deviati e sono proceduti in direzione rettilinea, mentre lascia passare quelli che hanno incontrato variazioni di indice di rifrazione e che sono quindi legati al fenomeno che si vuole studiare. L'immagine nella camera

apparirà quindi più scura in corrispondenza delle zone indisturbate dal fenomeno, mentre verrà illuminata dove i raggi incidenti sono stati deflessi.

- 5) Camera: quest'ultimo elemento serve soltanto per riuscire a cogliere il fenomeno e ad analizzarlo. Ovviamente, a seconda dell'ottica e della qualità dello strumento, si riusciranno ad ottenere immagini migliori e quindi di più facile analisi.

2.2 Problemi di sdoppiamento dell'immagine

Durante lo svolgimento dei primi test e le prime misurazioni, ci si è accorti di un grosso problema legato a questa configurazione, ossia un forte sdoppiamento dell'immagine che si otteneva fin dai primi centimetri di distanza dallo specchio concavo. Analizzando quindi in maniera opportuna questo fenomeno indesiderato e interrogandosi su quale potesse essere la causa, si è giunti alla conclusione che lo sdoppiamento fosse legato al fatto che la camera captava due immagini differenti dello stesso oggetto, una dovuta al cono di luce incidente, proveniente dalla sorgente puntiforme e l'altra riflessa dallo specchio concavo. Abbiamo quindi cercato di ovviare a questo inconveniente rendendo i due coni di luce, incidente e riflesso, il più possibile sovrapposti. Attuando questa contromisura però l'immagine ottenuta veniva in parte oscurata dallo specchio piano che, a causa del suo ingombro, impediva a parte della luce del LED di raggiungere lo specchio concavo.

Siccome l'unico modo per rendere meno evidente questo fenomeno era appunto sovrapporre il più possibile i due coni di luce, si è giunti alla conclusione che con il set-up da noi utilizzato e con lo specchio piano a nostra disposizione, che presentava un diametro elevato causando quindi un ingombro consistente, questo fosse pressoché impossibile e siccome l'aumento di risoluzione non era tale da poter giustificare uno sdoppiamento così accentuato, si è ritornati a una configurazione rettilinea, nella quale comunque il problema rimane presente, ma è minimizzabile fino a diventare trascurabile.

Con quest'ultima modalità, contenere lo sdoppiamento risulta infatti più semplice, dovendo semplicemente avvicinare il più possibile la sorgente puntiforme al blade e ottenendo quindi il minimo angolo tra cono incidente e cono riflesso.

Modificato il set-up sperimentale si è proseguito a studiare il fenomeno dello sdoppiamento cercando di ottenere una formulazione che, in base alla distanza del fenomeno dallo specchio concavo, ci permettesse di capire di quanto l'immagine si sarebbe sdoppiata, mantenendo ovviamente fissa la distanza tra blade e LED. Si è quindi posizionata una barretta di 2 millimetri di diametro a distanza variabile dallo specchio e tramite l'analisi delle immagini se ne è quantificato lo sdoppiamento.

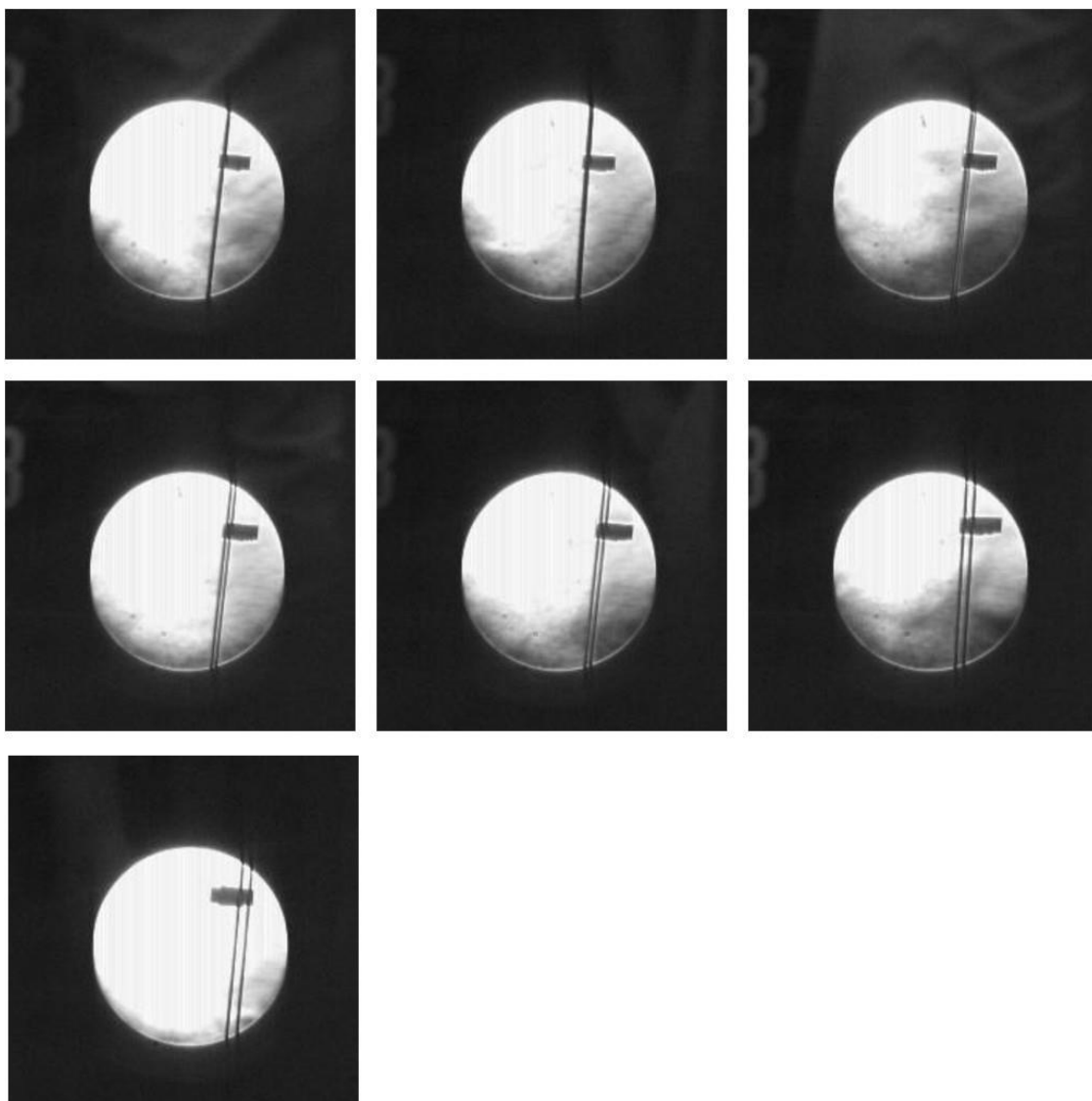


Fig 2.4- Immagini ottenute per l'analisi dello sdoppiamento con una barretta posta a diverse distanze dallo specchio concavo

Ottenute le immagini, esse sono state analizzate tramite l'utilizzo di MATLAB, quantificando il numero di pixel occupati dallo sdoppiamento via via che ci si allontanava dallo specchio concavo, includendo nella misura anche la luce che filtrava una volta che l'oggetto risultava completamente sdoppiato, come indicato nella Tab. 2.1.

Tab 2.1 – Dimensioni immagini in pixel

Immagine	1	2	3	4	5	6	7
Distanza[mm]	86	124	168	215	262	400	464
Pixel	5	5	7	8	8	10	10

Si è inoltre misurato a quanti pixel corrispondesse il diametro dello specchio, così da poter effettuare una proporzione pixel/mm. Lo specchio utilizzato aveva un diametro di 152,4 mm corrispondenti 124 pixel; analizzando invece le immagini dove la barretta risultava completamente sdoppiata e quindi ben distinguibile dal fondo si è notato che i 2 mm di spessore della barretta corrispondevano a circa 4 pixel. Si è quindi proseguito per cercare di trovare una formulazione matematica del suddetto fenomeno che andasse ad avallare la nostra analisi sperimentale.

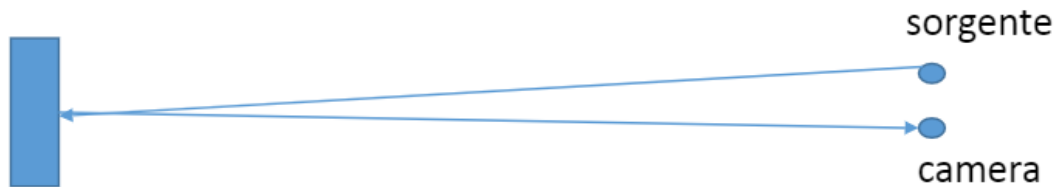


Fig 2.5 – Set-up sperimentale utilizzato per l'analisi dello sdoppiamento

Andando ad analizzare il set-up utilizzato, ci si è accorti che a giocare un ruolo fondamentale nella separazione dell'immagine vi fosse sicuramente la distanza in linea retta tra sorgente e camera/blade (sono intercambiabili in quanto dovranno necessariamente essere posizionati sullo stesso asse). Il motivo è che i raggi di ingresso dalla sorgente e quelli riflessi dallo specchio concavo non possono mai essere paralleli. Perciò, vengono sempre a formarsi due immagini ben distinte di un qualsiasi oggetto che venga posto davanti allo specchio, una dovuta ai raggi entranti, provenienti dalla sorgente e l'altra dovuta ai raggi riflessi, diretti verso la camera. La camera, che funge da osservatore, vede quindi le due immagini separate, in quanto nel suo campo visivo rientrano sia il raggio incidente sia quello riflesso. L'entità della separazione viene quindi ad essere dipendente da due parametri fondamentali: la distanza dallo specchio e la distanza retta tra sorgente e camera (da cui dipende ovviamente l'angolo di incidenza sullo specchio). Si è quindi giunti a questa formulazione matematica:

$$\Delta x = d \sin (\theta) \quad (2.1)$$

dove:

Δx = entità dello sdoppiamento dell'oggetto osservato

d = distanza tra specchio e oggetto analizzato

θ = angolo di incidenza tra i due fasci luminosi sullo specchio concavo.

Nella nostra configurazione la distanza tra specchio e camera risulta essere $D = 3048$ mm ossia, come affermato in precedenza, due volte la distanza focale dello specchio, mentre la distanza tra blade e sorgente luminosa (necessaria per trovare l'angolo θ) è pari a 70 mm. Tramite semplici calcoli si ottiene quindi un angolo di incidenza di 1.31° . Si è quindi cercata una corrispondenza tra la formula da noi ipotizzata e l'analisi sperimentale svolta, tenendo ovviamente conto del fatto che l'analisi sui pixel risulta essere soggetta a errore, essendo questi una misura estremamente quantizzata e quindi non particolarmente precisa, ancor di

più su un oggetto situato a lunghe distanze dalla camera e con l'obiettivo da 35 millimetri in nostro possesso. Applicando quindi la (2.1) per esempio al primo caso con $d = 86$ mm, $\Delta x = 5$ pixel = 2.5 mm, si ottiene un angolo di incidenza pari a $\theta = 1.66^\circ$, con un $\Delta\theta = 0.35^\circ$ rispetto al valore da noi ipotizzato. Questo risultato può essere considerato sufficientemente preciso in quanto, come affermato in precedenza, le distanze valutate in pixel risultano fortemente soggette a errore.

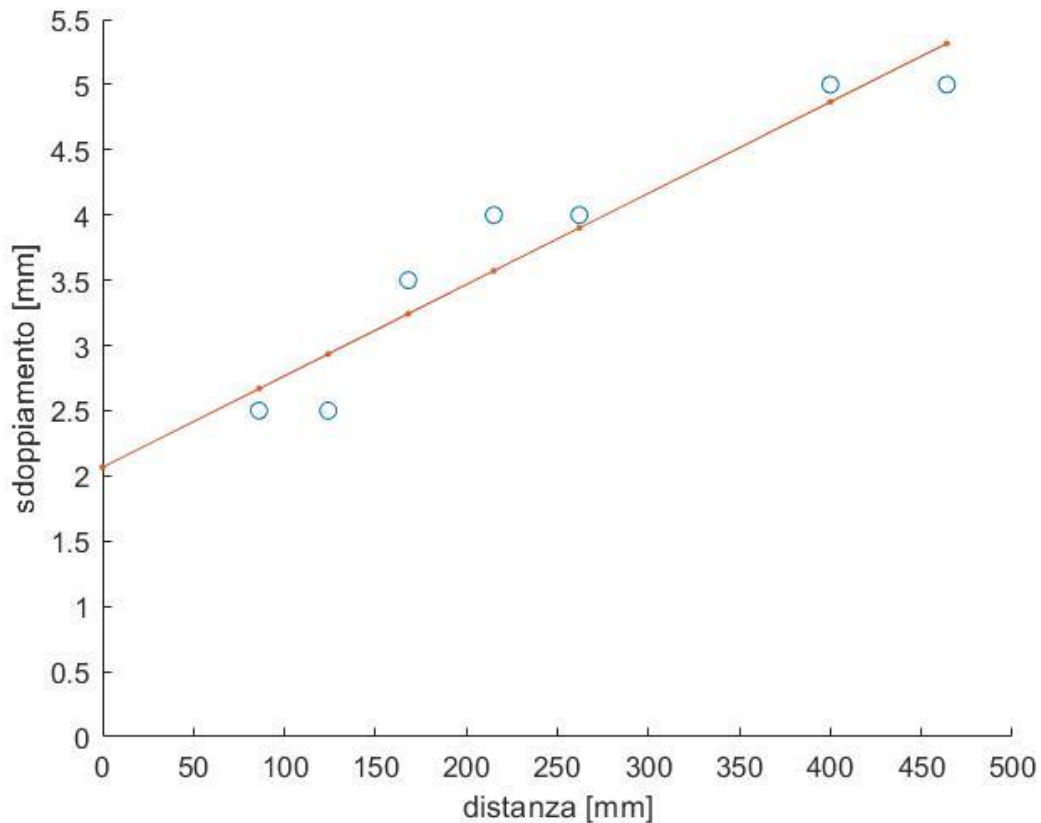


Fig 2.6 – Dati ricavati dall'esperimento

Nella Fig 2.6 sono riportati i risultati sperimentali. Sull'asse delle ascisse è raffigurata la distanza dallo specchio, mentre sulle ordinate l'entità dello sdoppiamento in millimetri. La retta è stata ottenuta tramite il comando MATLAB 'polyfit' approssimando i risultati sperimentali, che sono invece rappresentati con delle 'o'. Dall'analisi di questo grafico si nota chiaramente come i risultati sperimentali non si discostino di molto dalla nostra formulazione teorica. Si nota infatti che a distanza nulla dallo specchio si ottiene una barretta di 2.06 mm, compatibile con le dimensioni reali della stessa.

Concludendo, la formulazione da noi ipotizzata sul fenomeno dello sdoppiamento risulta essere sufficientemente attinente ai risultati reali e si ritiene dunque che i parametri fondamentali di quest'effetto indesiderato, come affermato in precedenza, siano la distanza dello specchio concavo dal fenomeno analizzato e la distanza retta tra sorgente luminosa e blade. Questi parametri non sono però del tutto eliminabili e causano quindi la presenza di uno sdoppiamento crescente con la distanza, non appena ci si distacca dallo specchio concavo con il fenomeno da visualizzare.

3. Applicazioni sperimentali

3.1. Primi esperimenti e rilevazione dei vortici di Von Karman

Una volta realizzato il set-up e dopo aver deciso di ritornare alla configurazione “in linea” con un singolo specchio per ridurre al minimo lo sdoppiamento, si è effettuata una serie di prove qualitative per capire quanto effettivamente potessimo rilevare. In particolare, si è partiti da situazioni con gradiente di densità molto grande, dunque facilmente rilevabile, fino ad arrivare a fenomeni che richiedevano una notevole sensibilità dello strumento, come ad esempio il flusso di aria calda prodotto da una mano. In tutti i casi affrontati, il sistema ha risposto molto bene, restituendo sempre un’ottima visualizzazione dell’esperimento.

Di seguito alcune immagini ottenute nel laboratorio del DIFI, riguardo a quanto sopracitato:

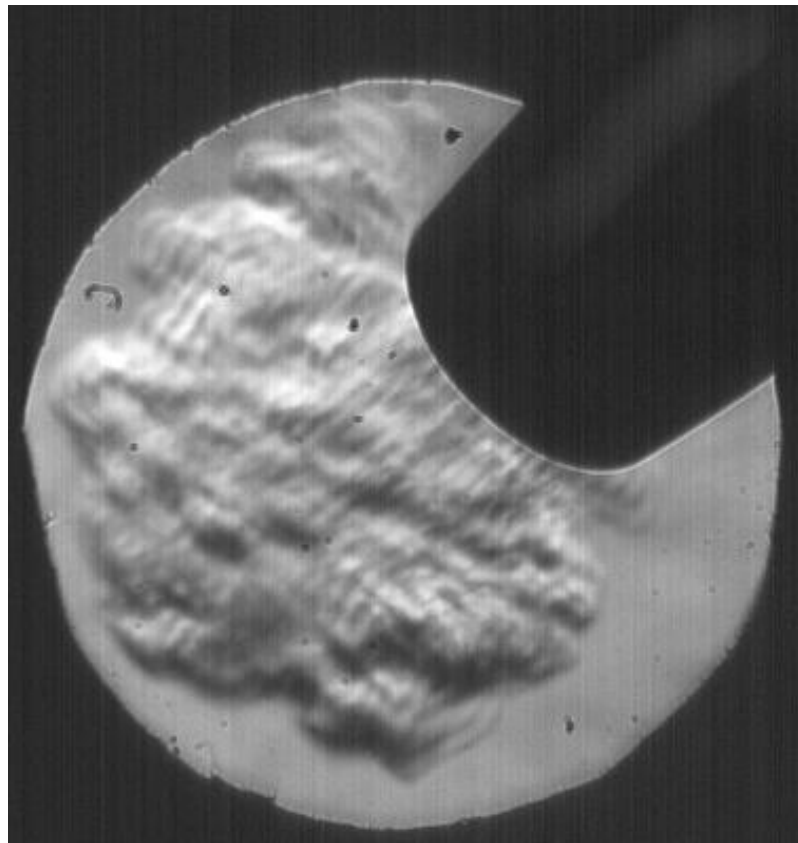


Fig. 3.1 – Moto di aria calda fuoriuscente da un phon

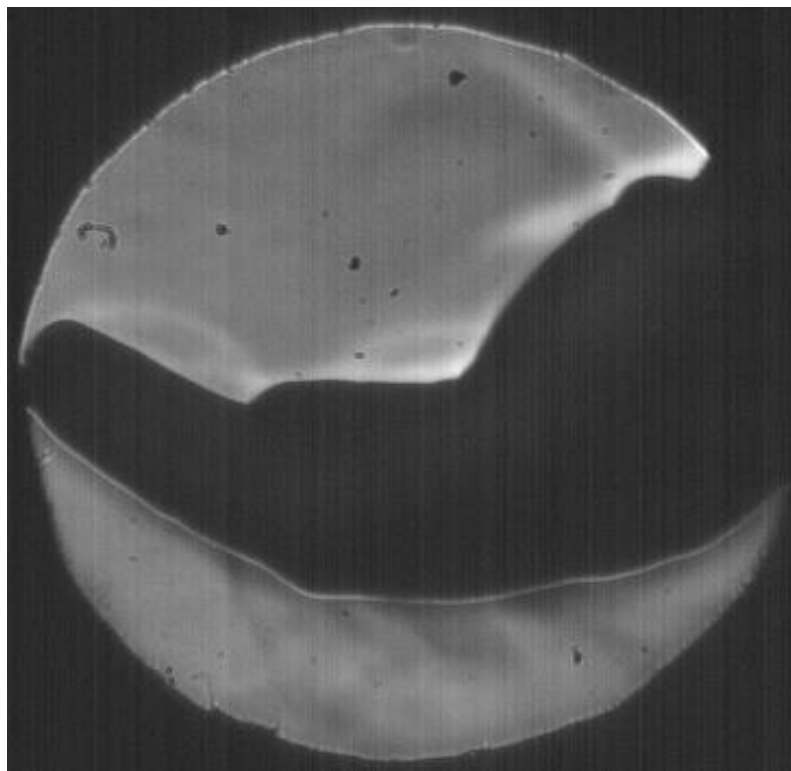


Fig. 3.2 – Variazioni di densità dell'aria intorno a una mano

Queste foto sono state realizzate con una camera Fastec IL3 1280x1024 (utilizzata anche per tutti gli altri esperimenti che saranno riportati nel seguito) e un obiettivo da 100 mm, in grado di restituire un'immagine nitida sulle distanze in gioco (circa 3 m).

Una volta testata la buona sensibilità dello strumento, si è passati a cercare risultati più quantitativi su tre fenomeni di interesse: i vortici di Von Karman, che si generano intorno a un corpo di forma cilindrica esposto a un moto fluido, i vortici di fondo ala, e i vortici che si sviluppano dietro ad un profilo alare, anch'esso esposto a un moto fluido, collegato a dei supporti elastici, dal cui moto oscillatorio si ha interesse a estrarre energia elettrica. In tutti questi tre casi, per dare risalto alle variazioni di densità che si avevano nella scia e dunque per vedere meglio i vortici, si è creata una lama di flusso caldo che andasse a impattare direttamente sull'oggetto in analisi e che rendesse dunque più evidenti i $\Delta\rho$ che si formavano a valle, a causa della sua interazione con il flusso. Per creare questa lama di flusso caldo, si è inserito, a monte del corpo in analisi, un filo in rame, del diametro di 0.5 mm, collegato a due morsetti tra i quali si è fatta circolare corrente; il calore disperso per effetto Joule andava dunque a scaldare il flusso che impattava sul filo, il quale non causava perturbazioni rilevanti nel moto, grazie al suo piccolo diametro. Il film caldo così generato, andando a sbattere sul corpo in analisi, ha reso possibile una visualizzazione più netta del fenomeno.

3.1.1 Vortici di Von Karman

I vortici di Von Karman sono una manifestazione vorticoso della scia che si genera da un flusso che incontra un corpo tozzo, generalmente di forma cilindrica.

È da evidenziare che essi non sono sempre presenti, ma che la loro esistenza nel flusso dipende fortemente dal numero di Reynolds associato al cilindro. Infatti la trattazione

teorica dei vortici di Von Karman [8] afferma che, considerando un flusso laminare che impatta sull'ostacolo, assumendo $Re = \frac{\rho u d}{\mu}$ (si veda la 3.1.1 più sotto), per Re molto bassi e inferiori a 0.1, il flusso rimane laminare passando intorno al cilindro e su di esso non si ha alcun distacco di vena fluida. Passando a regimi con $0.1 \leq Re \leq 5$ il flusso si mantiene laminare e senza separazioni; tuttavia, aumentando ancora Re si osserva che il moto intorno al cilindro non è più simmetrico tra monte e valle: da $Re \approx 5$ si ha infatti uno sbilanciamento nelle velocità del flusso prima e dopo il cilindro, con una diminuzione della velocità di valle, la quale causa un gradiente di pressione avverso al moto. A causa di questo squilibrio, per $5 \leq Re \leq 35$, lo strato limite superiore e quello inferiore iniziano a staccarsi nella zona prossima al punto di ristagno posteriore del cilindro investito dal flusso; essendo però il regime di moto ancora piuttosto basso, le due bolle di separazione a struttura vorticoso, si mantengono attaccate al cilindro e la scia distante da esso rimane simmetrica, stabile e imperturbata. All'aumentare di Re , per $35 \leq Re \leq 60$, a buona distanza di valle dal corpo, si iniziano a vedere le prime deboli ondulazioni della scia, con il flusso che resta ancora laminare, sia a monte sia a valle del cilindro. Il regime successivo è quello di maggior rilevanza per la trattazione dei vortici: per $60 \leq Re \leq 180$ le oscillazioni si fanno marcate anche nelle vicinanze del cilindro, con i vortici che si staccano dalla sua superficie e proseguono nel moto di scia. Aumentando ancora il regime di Reynolds, si ha un ingrandimento della zona di formazione dei vortici, che non si formano più vicino al punto di ristagno, ma iniziano a formarsi direttamente sulla superficie del cilindro. Tuttavia, facendo salire ancora Re , si entra in una zona di transizione che porta ad uno stato turbolento le strutture vorticoso (dopo $Re \approx 400$ i vortici sono completamente turbolenti), rendendole dunque meno visibili a un metodo che vede unicamente variazioni di densità, come lo Schlieren: in queste condizioni infatti i vortici mantengono sempre la loro macrostruttura circolare, ma siccome al loro interno il moto locale è turbolento e aleatorio, si hanno delle variazioni di densità in più direzioni, che vengono rilevate dalla grande sensibilità dello Schlieren, rendendo impossibile la visualizzazione delle strutture fluide: se si disponesse di un metodo ottico di visualizzazione di un moto fluido a tracciante (ad esempio il fumo), si vedrebbero i vortici turbolenti, mentre con un metodo che permette di osservare un moto fluido rilevando variazioni di densità, le turbolenze creano problemi, portando alla visualizzazione di una grossa scia, nella quale i vortici sono appena intravedibili solo in quelle zone dove la variazione di densità dovuta al vortice stesso prevale nettamente su quelle casuali e locali dovute al moto turbolento. La figura seguente mostra schematicamente come effettivamente i vortici vadano a formarsi nei regimi d'interesse appena trattati:

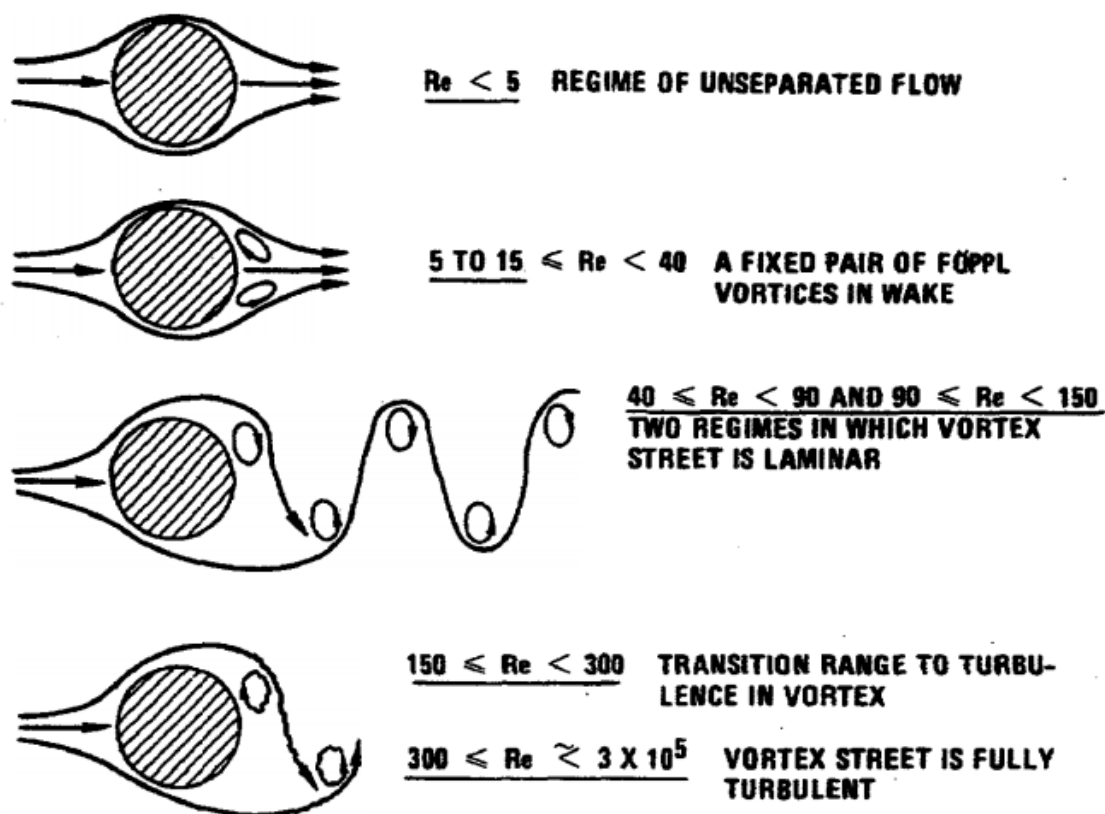


Fig. 3.1.1 – Regimi di formazione dei vortici

Nelle condizioni in cui la loro formazione ha luogo, i vortici di scia si generano dal distacco successivo e alternato di una delle due bolle di ricircolo che si sono formate in prossimità della superficie del cilindro, dove è avvenuta la separazione di strato limite, secondo la legge:

$$f = 0,198 \frac{u}{d} \left(1 - \frac{19,7}{Re}\right) \quad (3.1.1)$$

con:

f = frequenza del fenomeno di generazione dei vortici

u = velocità del moto indisturbato

d = diametro del cilindro su cui impatta il flusso

$Re = \frac{\rho u d}{\mu}$ numero di Reynolds del cilindro

ρ = densità del fluido (supposta costante)

μ = viscosità dinamica del fluido

In laboratorio si sono esposti tre corpi cilindrici ottenuti da una stampa 3D, il primo di diametro 3.00 mm, il secondo di diametro 4.00 mm e l'ultimo di diametro 6.00 mm, a un flusso d'aria generato da una piccola galleria del vento, in alcune condizioni di moto.

In particolar modo, si voleva determinare qualitativamente in che modo i vortici variassero al variare del diametro del corpo d'impatto, facendo un confronto a due velocità, mantenute uguali e costanti per ciascun cilindro.

Supponendo una viscosità cinematica $\nu = \frac{\mu}{\rho} = 1,5 \cdot 10^{-5} \left[\frac{m^2}{s} \right]$ costante alla temperatura di 20°C, i regimi di prova sono stati i seguenti:

Tab. 3.1.1 – Regimi di prova per filo con $d=3,00$ mm

	Diametro Filo [mm]	Voltaggio ventola [V]	Velocità u [m/s]	Re [adimensionale]	Frequenza teorica f [1/s]
1	3.00	1.0	1.00	200.0	59.5
2	3.00	1.0	1.62	324.0	100.4

Tab. 3.1.2 – Regimi di prova per filo con $d=4,00$ mm

	Diametro Filo [mm]	Voltaggio ventola [V]	Velocità u [m/s]	Re [adimensionale]	Frequenza teorica f [1/s]
3	4.00	1.0	1.00	266.7	45.8
4	4.00	1.0	1.62	432.0	76.5

Tab. 3.1.3 – Regimi di prova per filo con $d=6,00$ mm

	Diametro Filo [mm]	Voltaggio ventola [V]	Velocità u [m/s]	Re [adimensionale]	Frequenza teorica f [1/s]
5	6.00	1.0	1.00	400.0	31.4
6	6.00	1.0	1.62	648.0	51.8

Di seguito si allega un fotogramma per ciascun regime di prova: le immagini sono state ottenute campionando a 200 fps, con esposizione 4/1000 s, montando un obiettivo da 100 mm su una camera Fastec IL3 1280x1024; in tutte le immagini, il flusso si muove da destra a sinistra.

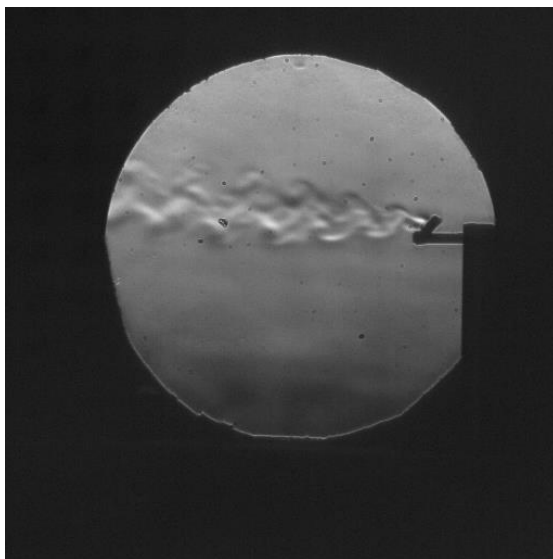


Fig. 3.1.2 – Fotogramma prova 1

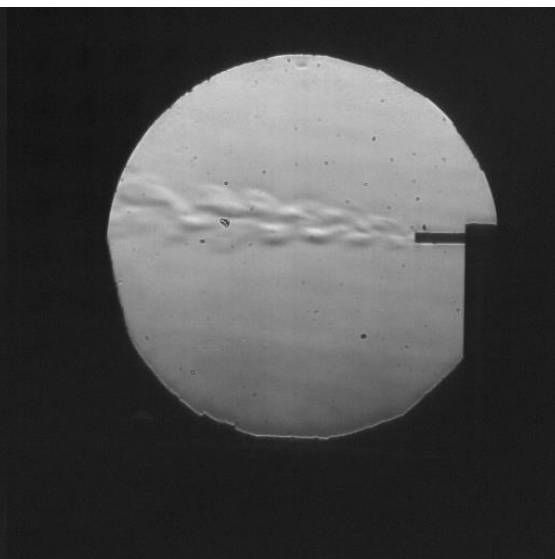


Fig. 3.1.3 – Fotogramma prova 2

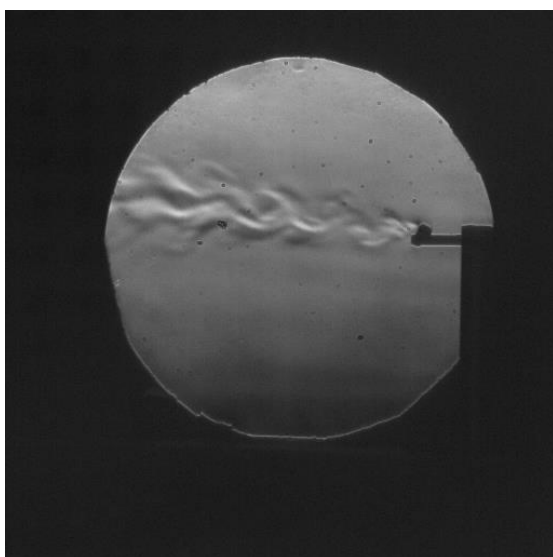


Fig. 3.1.4 – Fotogramma prova 3

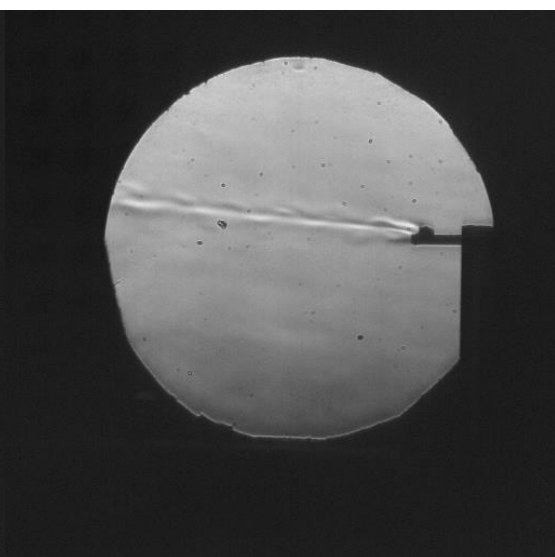


Fig. 3.1.5 – Fotogramma prova 4

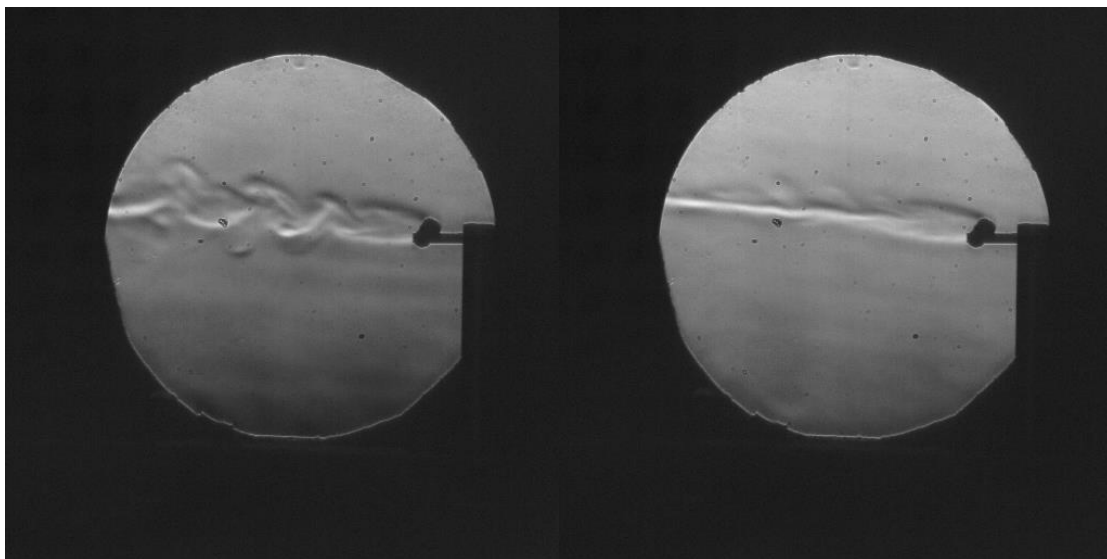


Fig. 3.1.6 – Fotogramma prova 5

Fig. 3.1.7 – Fotogramma prova 6

Prima di iniziare l'analisi, si specifica che i regimi di prova 1, 3, 5, seppur abbiano la stessa tensione di alimentazione alla ventola (1 V) degli altri tre regimi, in realtà siano caratterizzati da minori velocità del flusso, in quanto, prima della sezione di prova, si è inserita una matrice a nido d'ape, che uniformasse e rallentasse il flusso subito a monte della zona di osservazione.

Purtroppo, con gli strumenti a disposizione non si è potuti scendere a regimi con $Re < 200$, nei quali i vortici sarebbero sicuramente stati più netti nella visualizzazione; Tuttavia, per quanto riguarda le prove 1, 3, 5, effettuate a velocità più basse ($200 \leq Re \leq 400$), i vortici sono ancora ben visibili, e le frequenze teoriche calcolate in tabella sono significative e paragonabili a quelle rilevate graficamente dall'analisi delle immagini.

Osservando invece i fotogrammi delle prove a velocità maggiori, effettuate senza la presenza del setto (*Fig. 3.1.3, 3.1.5, 3.1.7*), si nota come, entrando in turbolenza, i vortici siano via via meno visibili, fino praticamente a scomparire nella (*Fig. 3.1.7*) dove essi sono completamente turbolenti ($Re = 648$).

Facendo invece un confronto a velocità costante e al variare dei diametri, si può notare come, passando dal diametro di 3.00 mm a quello di 6.00 mm e considerando la velocità minore (*Fig. 3.1.2-3.1.4-3.1.6*), diminuisca la frequenza di generazione dei vortici (coerentemente alla 3.1.1, dove il diametro d è a denominatore e pesa di più rispetto all'aumento di Re) e aumenti la loro ampiezza. Non si può fare la stessa analisi sulle (*Fig. 3.1.3, 3.1.5, 3.1.7*), ottenute con $u = 1,62$ m/s, in quanto la visualizzazione dei vortici, specie nei fotogrammi delle prove 4 e 6, risulta poco significativa. Relativamente ai fotogrammi delle prove 5, 6 è infine interessante sottolineare come le grandi dimensioni del cilindro ($d = 6$ mm), causino a valle un'ampia zona di bassa pressione dove si ha ricircolo, prima della formazione di una scia vorticoso che si muove nella stessa direzione del moto imperturbato.

Terminata l'analisi sui vortici di Von Karman, si è affrontata qualitativamente l'analisi del comportamento di un moto fluido intorno a una paletta e intorno a un profilo alare connesso a dei supporti elastici, di cui si tratterà nel seguito.

3.1.2 Comportamento del moto dietro una paletta e generazione di un vortice e di una scia intorno a un profilo oscillante

A titolo di complemento, si sono svolte anche queste due sperimentazioni: la prima per vedere come varia macroscopicamente la scia dietro un'ala esposta ad aria in moto laminare, in funzione del suo angolo d'attacco; la seconda per capire qual è l'influenza dei vortici che si formano su un sistema aeroelastico dal quale si vorrebbe estrarre energia, costituito da un profilo esposto al vento e montato su due supporti elastici: l'alternanza di prevalenza di forza di lift e di reazione data dagli elastici, fanno sì che il sistema, sopra certe velocità, si stabilizzi su moti alternati costanti. Nelle immagini a seguire si può osservare quanto ottenuto graficamente per le due configurazioni sopracitate.

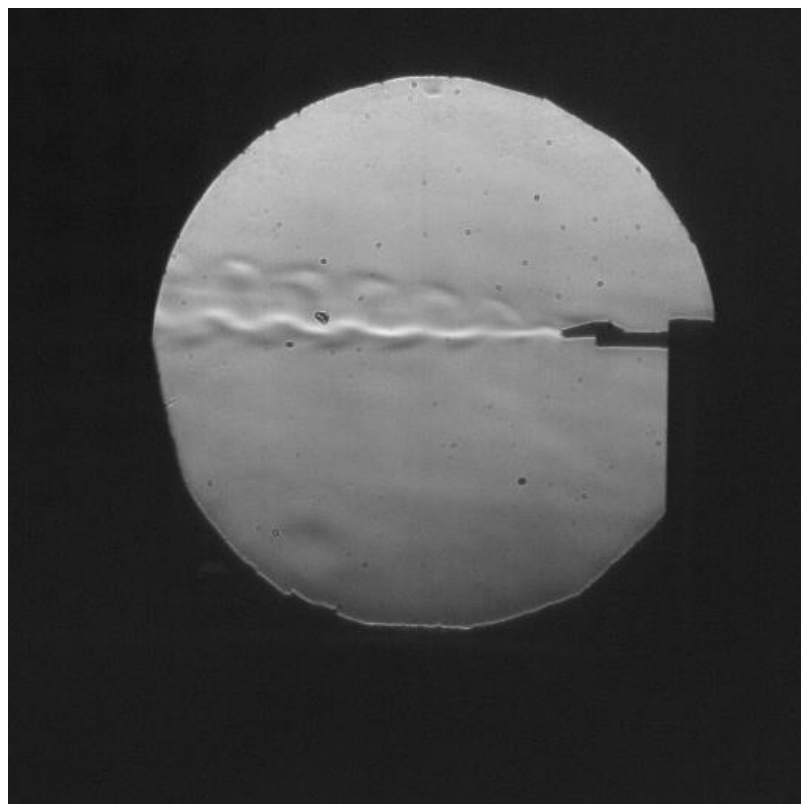


Fig. 3.1.8 – Vortici di fondo ala con angolo d'attacco nullo

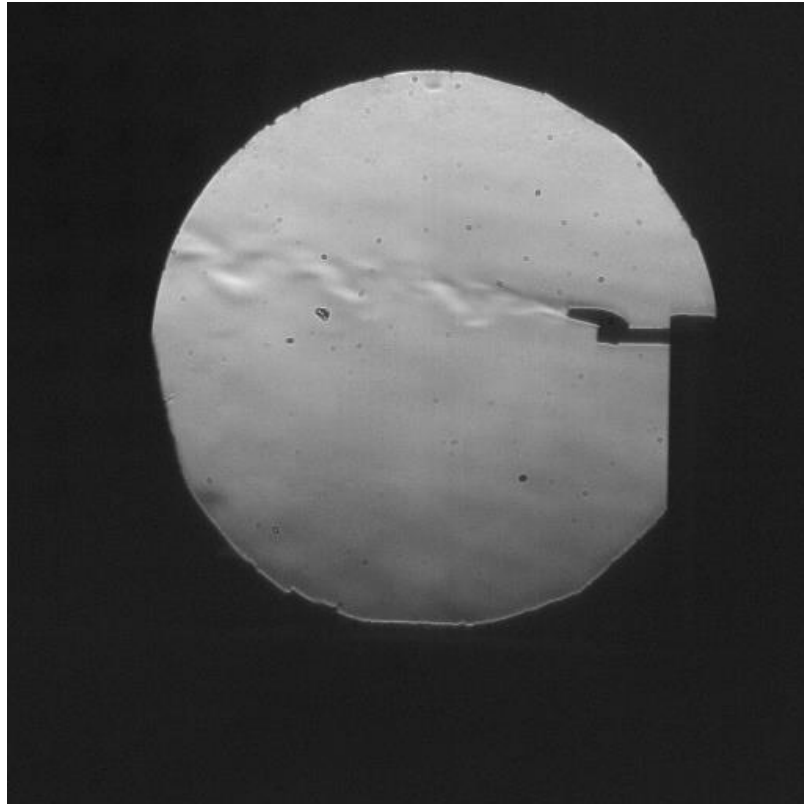


Fig. 3.1.9 – Vortici di fondo ala con angolo d'attacco negativo

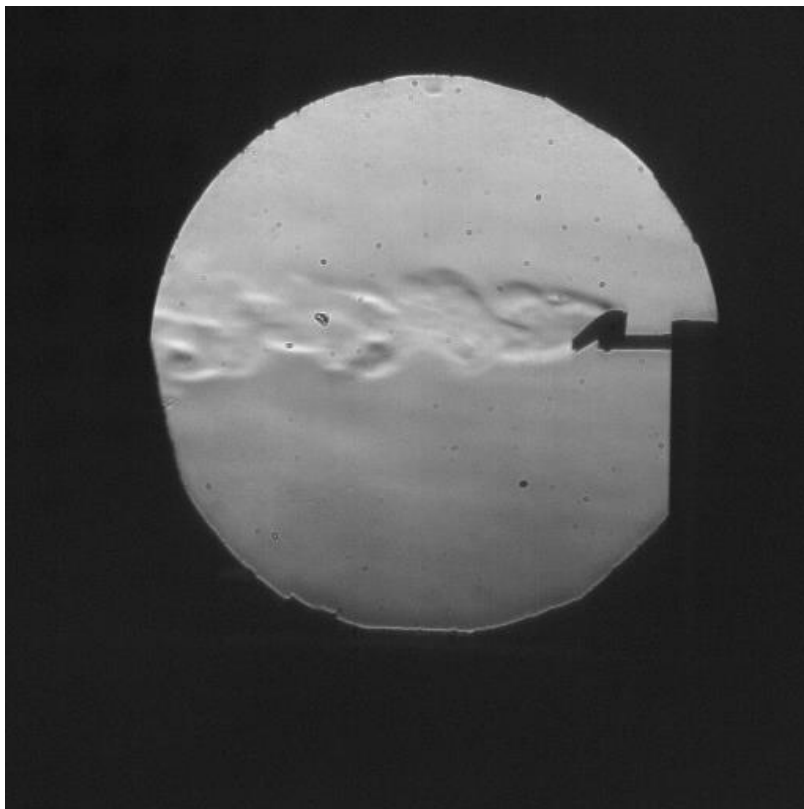


Fig. 3.1.10–Vortici di fondo ala con angolo d'attacco positivo

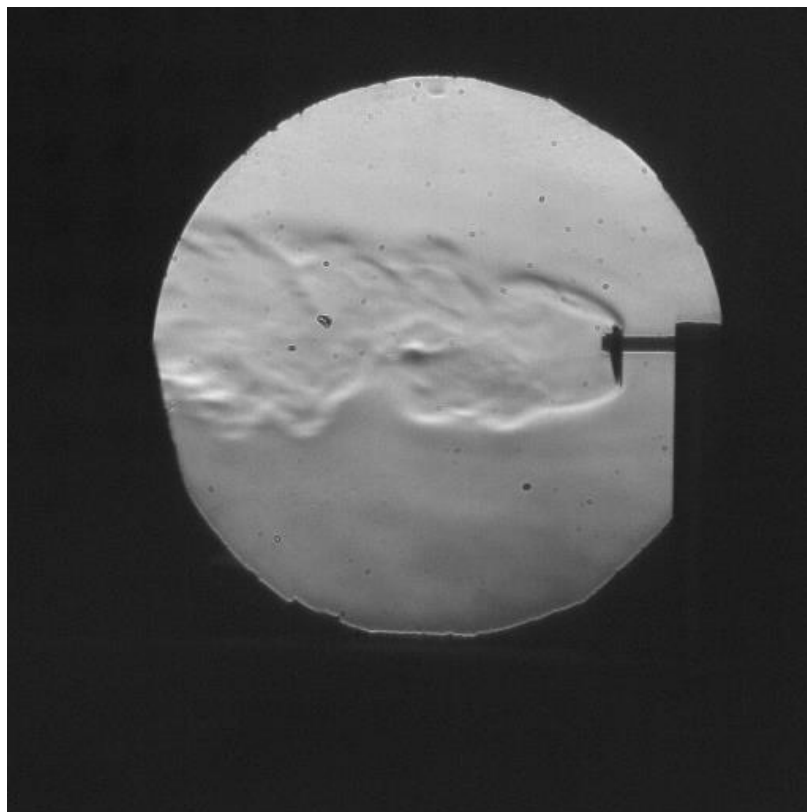


Fig. 3.1.11 – Vortici che si generano a valle della pala posta perpendicolarmente alla direzione del moto

Analizzando questa serie di immagini, si può notare come, nel primo caso (*Fig. 3.1.8*), il vortice si sviluppi in modo regolare e costante, senza che si abbiano distacchi dello strato limite sull'ala. Nella *Fig. 3.1.9* i vortici risultano meno marcati e, con angolo d'attacco negativo, si ha una pressione maggiore all'estradosso, che genera una spinta verso il basso. Passando alla *Fig. 3.1.10*, si capovolge la situazione precedente: l'angolo d'attacco questa volta è positivo, ma siccome è molto grande, il flusso non segue più l'ala in maniera corretta fino al bordo d'uscita: all'estradosso si ha un distacco di vena fluida appena superato il naso della pala; questo distacco genera una bolla di ricircolo e porta la pala in stallo. Infine, nell'ultima immagine, *Fig. 3.1.11*, si è disposta l'ala completamente perpendicolare al flusso: subito a valle di essa, si genera una grande scia turbolenta e nell'area subito susseguente il profilo, si ha una zona depressionaria molto estesa, nella quale è facile visualizzare dei riflussi.

Per terminare, si riportano tre immagini relative al sistema aeroelastico, costituito da un'aletta polimerica libera di ruotare intorno a un asse longitudinale, collegato ad una struttura rigida mediante elastomeri. Quando investito dal flusso, il sistema oscilla, seguendo il fenomeno del "flutter".

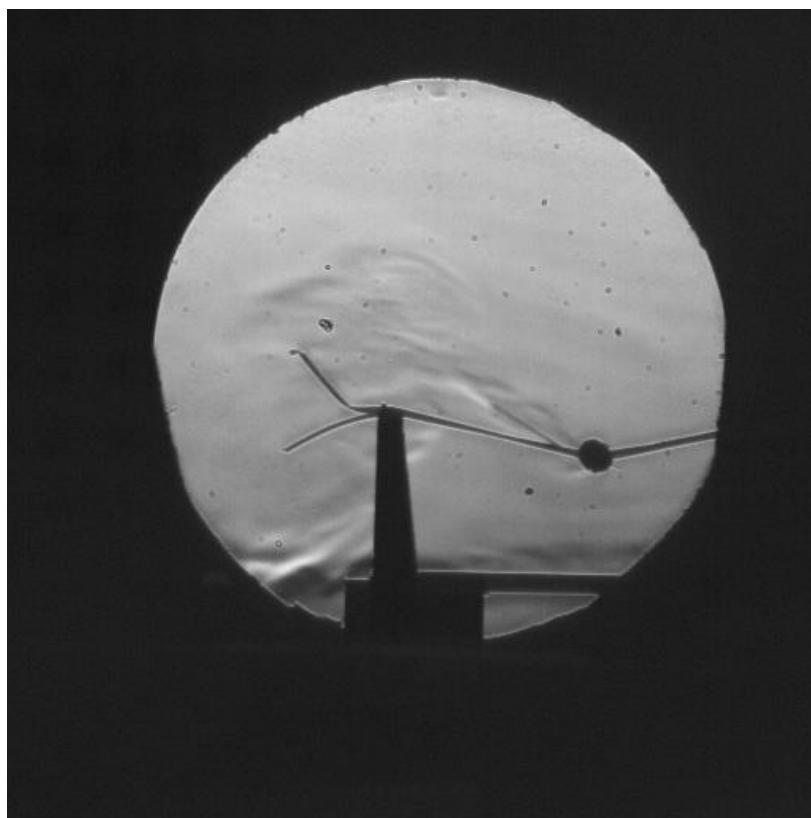


Fig. 3.1.12 – Flap nella posizione di minimo

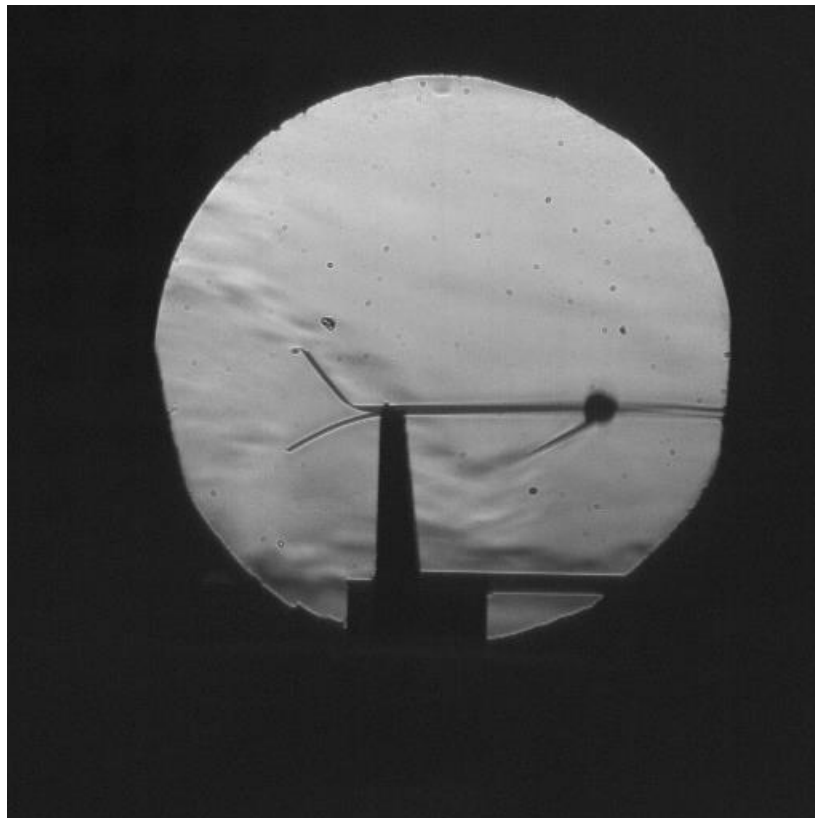


Fig. 3.1.13 – Flap nella posizione intermedia, in ascesa

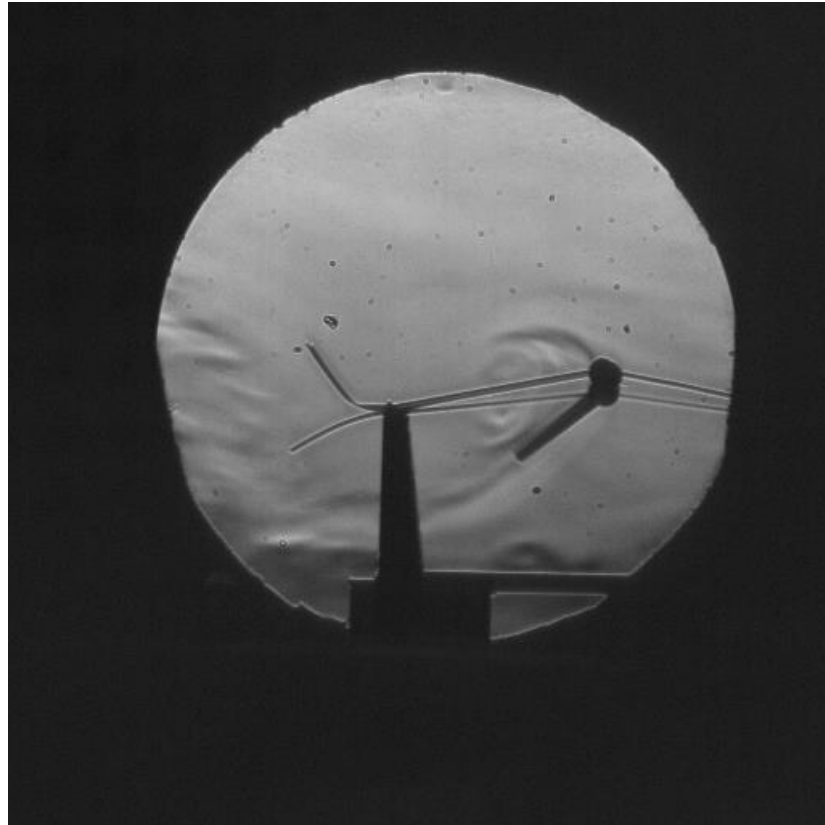


Fig. 3.1.14 – Flap nella posizione di massimo

Osservando la *Fig. 3.1.12* si vede come il flap, che si trova nella posizione più bassa raggiungibile dal sistema, formi una scia parallela alla sua direzione: a questo punto, quando la forza elastica vince quella di deportanza (il lato in pressione, nella *Fig. 3.1.12*, è quello superiore), il flap comincia a salire e si dispone con un angolo d'attacco positivo; infatti, nella *Fig. 3.1.13* la forza elastica è nulla, ma esso continua a risalire, spinto dalla forza di lift che si genera dall'interazione pala-flusso. Infine, nella *Fig. 3.1.14*, il flap si trova nella sua posizione più alta (nella figura esso è leggermente sbilanciato a causa di un disallineamento dei supporti elastici) e, siccome l'angolo d'attacco diviene troppo alto, sulla superficie superiore si ha un precoce distacco dello strato limite, che dinamicamente porta alla generazione di un vortice: il profilo va in stallo e la forza elastica prevale su quella di portanza, portando la pala a scendere nuovamente, ripetendo ciclicamente quanto appena descritto.

L'intento di quest'ultimo sotto-capitolo era quello di mostrare come il metodo Schlieren sia versatile e, grazie alla sua elevata sensibilità, applicabile a molti campi, dalla microfluidodinamica allo studio di problemi di similitudine fluidodinamica anche per grandi oggetti.

Nell'ultima parte dell'elaborato si proseguirà con un'analoga trattazione per il metodo BOS.

4. BOS

4.1 introduzione metodologia BOS

La tecnica BOS (background-oriented-Schlieren) deriva direttamente da quella Schlieren classica e si propone di arrivare agli stessi risultati utilizzando un apparato sperimentale di più facile sviluppo, con minori costi e difficoltà di ottimizzazione. Anch'essa si occupa di visualizzare le variazioni di indice di rifrazione nel fluido analizzato, non facendo uso di uno specchio concavo, ma tramite la semplice analisi dell'immagine captata dalla camera correlata a quella del "fondale" dietro di essa.

Grazie allo sviluppo di nuove tecnologie legate all'analisi delle immagini e al diminuire del costo dell'elettronica, nell'ultimo decennio la tecnica BOS è diventata di grande interesse in ambito scientifico. A differenza di altre tipologie di analisi dei moti fluidi, come la PIV (Particle Image Velocimetry), la BOS non necessita né di laser ad elevata precisione né di dover inseminare il fluido con particelle di tracciante, portando così a una notevole riduzione dei costi e a una sostanziale facilità di utilizzo. Rispetto ad altre tecniche risulta quindi sicuramente più economica e di più facile applicazione, rivelandosi particolarmente utile in tutte le circostanze dove non è possibile studiare il fenomeno in laboratorio, come nel caso dei flussi supersonici legati all'aeronautica o in tutte le situazioni dove l'entità del fenomeno studiato risulti di dimensioni troppo elevate per poter essere posizionato davanti ad uno specchio concavo, il quale per limiti tecnologici e di costo non può superare diametri troppo elevati.

Il principio di funzionamento del BOS risiede nella correlazione tra fenomeno studiato e fondale, il quale deve presentare delle caratteristiche opportune che tratteremo in seguito. Questa tecnica, nella sua versione più semplice, si compone di una camera e uno sfondo opportunamente illuminato; tramite post-processing si compara l'immagine del solo sfondo senza alcun tipo di distorsione data dal fenomeno analizzato, con l'immagine ottenuta in presenza del moto fluido, che causa una variazione di densità o di indice di rifrazione dell'aria, la quale viene percepita dalla camera sotto forma di "spostamento" di parte del pattern che compone il fondale. Ovviamente, ad avere notevole importanza in questa particolare tecnica vi è sicuramente l'analisi delle immagini, la quale deve risultare il più veloce e accurata possibile e, nel caso si voglia ricorrere a un software professionale, rappresenta la maggior parte dei costi di investimento per l'implementazione della tecnica BOS, insieme alla camera.

4.2 Set-up sperimentale

Il set-up sperimentale si compone di pochi elementi nel quale andiamo a trattare anche il software di post-processing, in quanto esso è fondamentale per poter ottenere le immagini definitive. Il BOS si può realizzare semplicemente tramite l'uso di una camera, un fondale nel quale viene rappresentato un pattern opportuno, una fonte luminosa che renda possibile una corretta visualizzazione del fenomeno e un software in grado di effettuare il post-

processing delle immagini ottenute, spesso molto simile a quelli utilizzati per l'analisi delle immagini PIV.

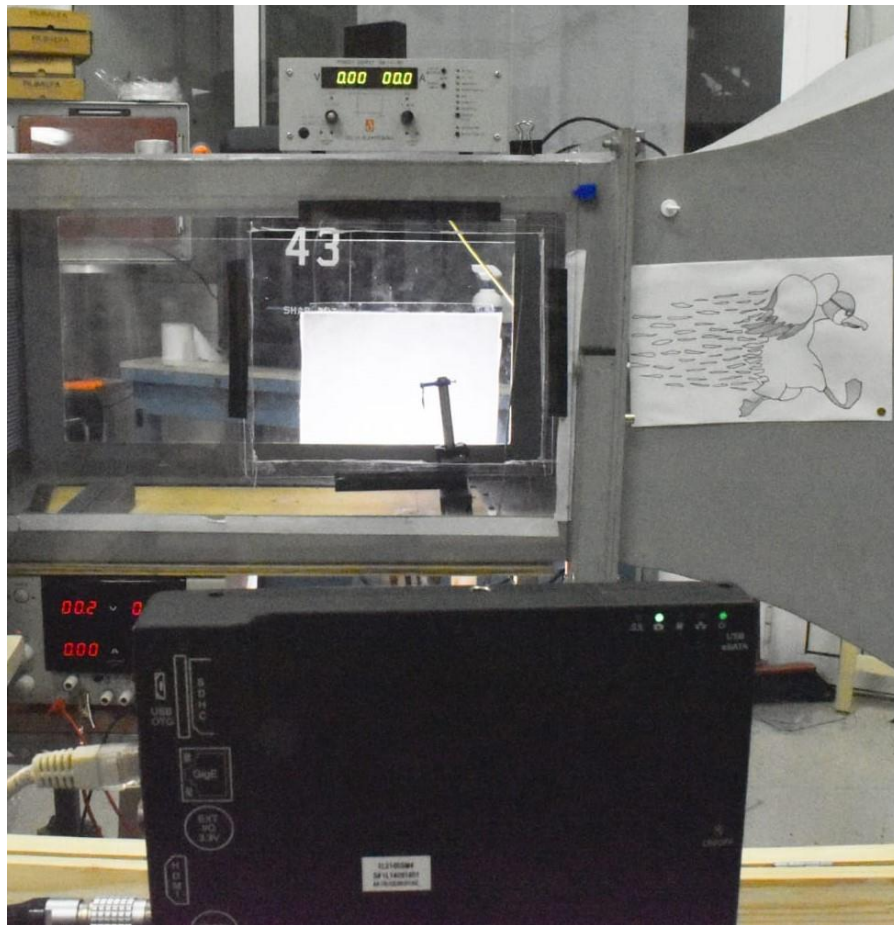


Fig 4.1 – Foto del nostro sistema sperimentale

Si passa ora, come effettuato in precedenza per il set-up della fotografia Schlieren, ad analizzare più nel dettaglio ogni elemento del sistema sperimentale:

- 1) Camera: si occupa di effettuare le riprese del moto fluido da analizzare e quindi deve presentare delle caratteristiche di risoluzione e fps tali da poter permettere una corretta visualizzazione del fenomeno, anche se non sono necessarie delle proprietà particolari per poter effettuare un'analisi BOS delle immagini. Si cerca comunque di utilizzare delle camere con un sensore abbastanza ampio, così da poter chiudere il più possibile il diaframma senza perdere troppa luminosità e guadagnando un campo di messa a fuoco più esteso. Uno dei problemi cardine della metodologia BOS è infatti la necessità di messa a fuoco, non sul fenomeno, ma sullo sfondo, per poter eseguire una corretta correlazione tra immagini. In questo modo però si ottengono delle immagini sfuocate e poco adatte ad un'analisi quantitativa precisa. Nel nostro caso si è utilizzata una camera FASTEC IL3 con obiettivo da 35 mm.
- 2) Sfondo: per la scelta di quest'ultimo si è dovuta effettuare una ricerca tra alcuni degli articoli scientifici in merito, in modo tale da ottenere dei risultati

significativi. Lo sfondo ha infatti un ruolo fondamentale per ricavare delle immagini di qualità ed è fortemente responsabile della sensibilità del sistema. Basandoci su quanto riportato in [7], si è scelto di utilizzare uno sfondo con un pattern di tipo geometrico e non casuale come spesso accade nell'implementazione BOS, che presentasse un numero di punti con diametro compreso tra 2 e 4 pixel, in modo da catturare al meglio lo spostamento del pattern causato dal gradiente di densità.

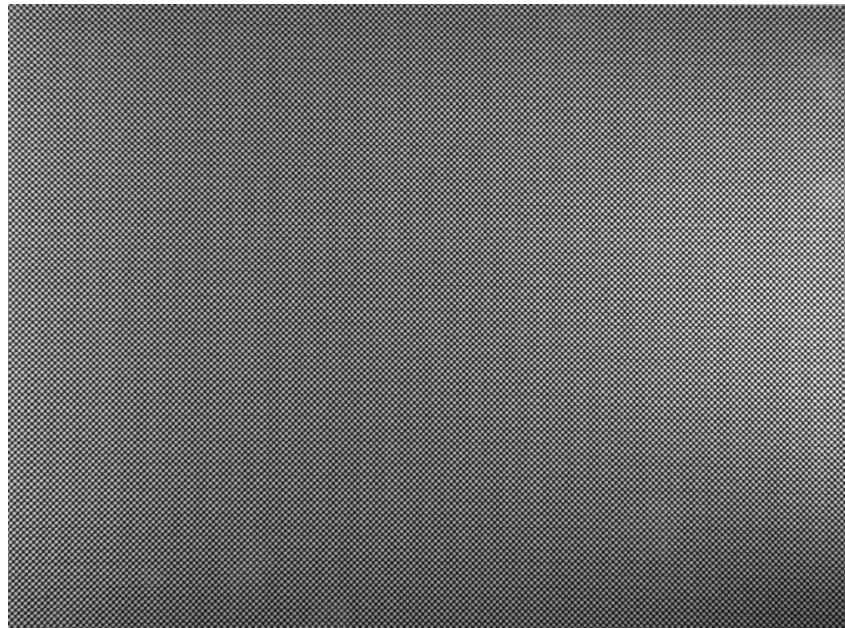


Fig. 4.2 - Sfondo utilizzato per implementazione del BOS

Questo tipo di raccomandazione è tratto dalla PIV dove, al posto di avere il background, il fluido viene inseminato con delle particelle di tracciante, le quali devono rientrare appunto in quest'intervallo. Ovviamente la distanza tra camera, con il proprio obiettivo, e sfondo, va a influire sulla dimensione dei quadrati, i quali devono rientrare nel range sopracitato per poter ottenere delle immagini significative. Altri aspetti che devono essere tenuti in considerazione sono l'illuminazione dello sfondo, nel nostro caso ottenuta con una luce LED che si infrangeva direttamente sul foglio A4 dove era riportato il pattern e il bilanciamento del bianco della camera, che aiuta a ottenere un maggiore contrasto tra quadrati bianchi e neri. Nel caso si voglia migliorare ulteriormente il contrasto, si può stampare il background non su un foglio di carta, ma su una lamina di plastica che presenti quadrati trasparenti e quadrati neri ed effettuando un'illuminazione più efficace dello stesso, come eseguito da [9], si riesce a ottenere maggiore contrasto.

- 3) Sorgente luminosa: tramite questa si cerca di ottenere un'illuminazione il più omogenea possibile dello sfondo che si ha a disposizione, senza avere delle zone con luminosità maggiore delle altre, prediligendo sorgenti di tipo continuo, che non causino quindi, se riprese ad alta velocità, dei continui lampi di luce, come

accadrebbe per esempio con un'illuminazione tramite Neon. Nel nostro set-up si è quindi utilizzata una luce LED di tipo continuo, posta immediatamente dietro al background, da 30 Watt di potenza.

- 4) Software di post-processing: è necessario per effettuare l'analisi delle immagini calcolando lo spostamento dei punti presenti sul pattern tra un'immagine e la successiva. Una qualità che si ricerca è la rapidità dello stesso, che ci permetta di visualizzare anche moti fluidi più lenti, ottenendo risultati in tempi più che ragionevoli e rendendo questa tecnica ancora più versatile. Si è deciso di utilizzare il software open source "imageJ", il quale ci ha permesso anche di applicare dei filtri alle immagini ottenute, migliorandone la qualità e rendendole di più facile analisi. I principali passaggi che si sono effettuati per l'analisi delle immagini sono i seguenti: 1) in assenza del fenomeno da analizzare viene catturata l'immagine del background relativa al grado di illuminazione presente; 2) si introduce il moto fluido e si effettua un filmato salvato tramite singole immagini in successione (tif); 3) si inseriscono le immagini sul software di post processing e si effettua una "sottrazione" tra le immagini con il moto fluido presente e il background; 4) sempre tramite l'uso del software si aumenta il contrasto del filmato ottenuto; 5) si applica un filtro gaussiano, che si comporta come un filtro passa-basso, preservando però almeno in parte le alte frequenze delle immagini che vanno solitamente a costituire i contorni delle figure all'interno delle stesse. Il passaggio più importante tra quelli riportati è sicuramente quello della "sottrazione" tra le immagini riguardanti il fenomeno e il background, in quanto ci permette di individuare tutti i punti del nostro pattern che hanno subito delle modifiche o degli spostamenti, a causa del gradiente di densità dato dal moto fluido. Senza questo passaggio le immagini ottenute risultano completamente inutilizzabili a causa delle piccole variazioni tra un'immagine e la successiva, che vengono rese macroscopiche solo tramite la sottrazione.

Ovviamente software proprietari permettono un tipo di analisi più avanzata, consentendo di ottenere maggiore qualità e significatività delle immagini e richiedendo però maggiori costi di investimento iniziale.

4.3 Analisi sperimentale

Nei primi test si è cercato di osservare dei fenomeni che presentassero dei forti gradienti di densità causati da fonti di calore a temperatura elevata. Prima di tutto si è analizzato il moto fluido causato da un lumino, come visibile nella figura sottostante.

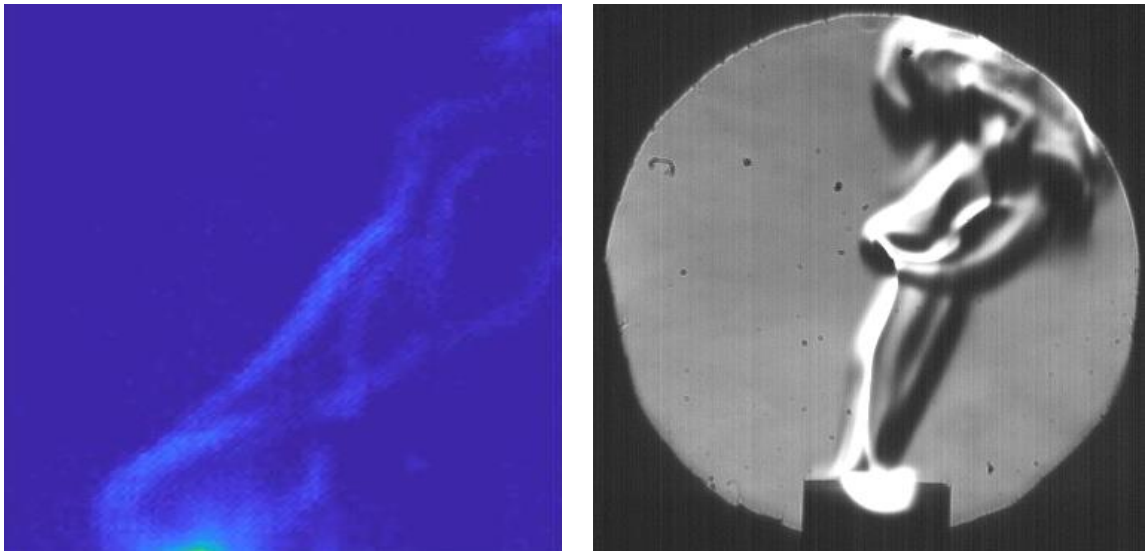


Fig. 4.3 – Perturbazione sopra un lumino acceso, catturata con BOS (a sinistra) e con Schlieren classico (a destra)

Come si può notare, anche paragonandolo all'immagine ottenuta dallo Schlieren classico, queste due metodologie risultano in questo caso pressoché interscambiabili, fornendo risultati del tutto analoghi. Il gradiente di densità appare estremamente visibile grazie anche ad un'opportuna colorazione e la sensibilità dell'analisi BOS è invariata o sufficientemente paragonabile a quella Schlieren. Oltre al lumino si sono effettuati altri test utilizzando un blocco di alluminio scaldato sopra un fornello e posto sotto osservazione nella galleria del vento a nostra disposizione, sia in presenza di vento, sia in una situazione statica, ottenendo nuovamente risultati in linea con i precedenti, come mostrato in *Fig. 4.4*.

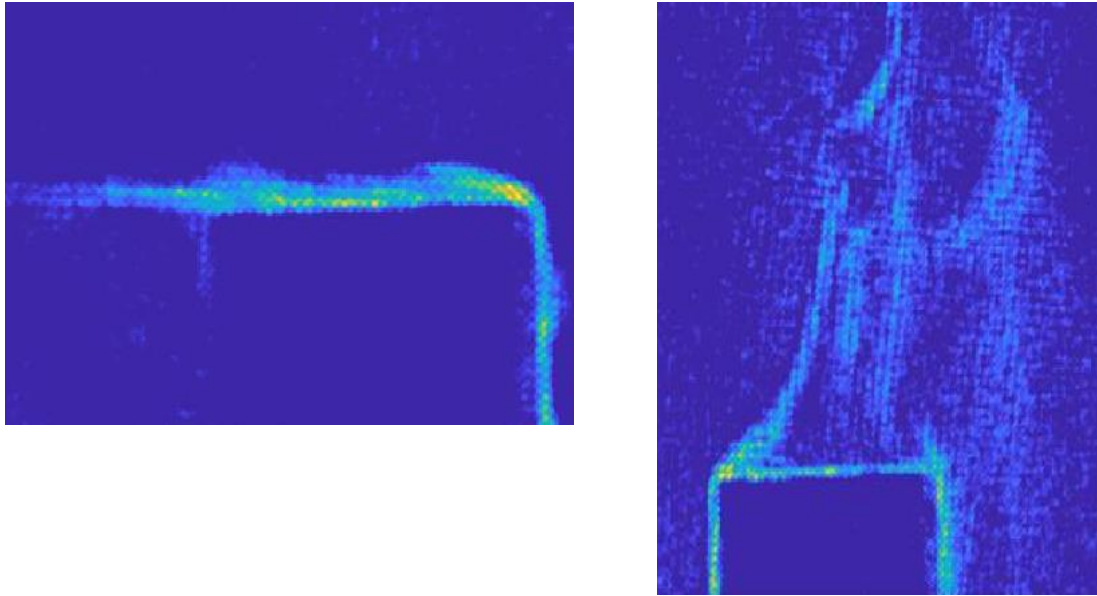


Fig.4.4 - Blocco riscaldato in presenza e in assenza di vento

Proseguendo con l'analisi sperimentale, si è cercato di replicare anche con questa metodologia i risultati ottenuti per lo Schlieren classico, andando ad analizzare il moto fluido attorno a un cilindro con formazione dei vortici di Von Karman. Inizialmente si è cercato di utilizzare lo stesso set-up messo a punto precedentemente, con un filo riscaldato tramite il passaggio di corrente, che fornisse calore per rendere più evidente la variazione di densità necessaria per l'analisi; purtroppo però in questo caso non si è riusciti ad ottenere risultati soddisfacenti. Questo è dovuto al tipo di analisi che si effettua con il metodo BOS: infatti, con questo sistema, la deflessione lungo y : $\epsilon_y = \frac{1}{n_0} \int \frac{\partial n}{\partial y} dz$, come affermato precedentemente in (1.1) risulta essere legata a un integrale del gradiente dell'indice di rifrazione verticale, effettuato lungo z , ossia la distanza tra le varie parti che compongono il sistema. Utilizzando il set-up con il filo riscaldato si riesce a ottenere una "lama" di calore che risulta di spessore estremamente limitato, funzione dello spessore del filo che viene utilizzato. Questa "lama" appare quasi bidimensionale e perpendicolare rispetto alla distanza camera-background. Effettuando l'integrale sulla distanza, la sua entità è troppo limitata e non viene quindi percepita dal sistema, non conferendo quindi significatività alle immagini. Si sono cercate delle soluzioni per ovviare a questa limitazione del sistema BOS, che risulta quindi poco pratico in tutte le circostanze in cui il moto fluido non causi autonomamente forti variazioni di indice di rifrazione, come accadeva per il lumino e per il blocco di alluminio. Una delle possibilità affrontate è stata quella di scaldare direttamente un cilindro ceramico cavo con diametro di 5 millimetri, tramite un filo attraversato da corrente che passasse al suo interno, riuscendo così a raggiungere temperature piuttosto elevate sull'oggetto che si desiderava studiare.

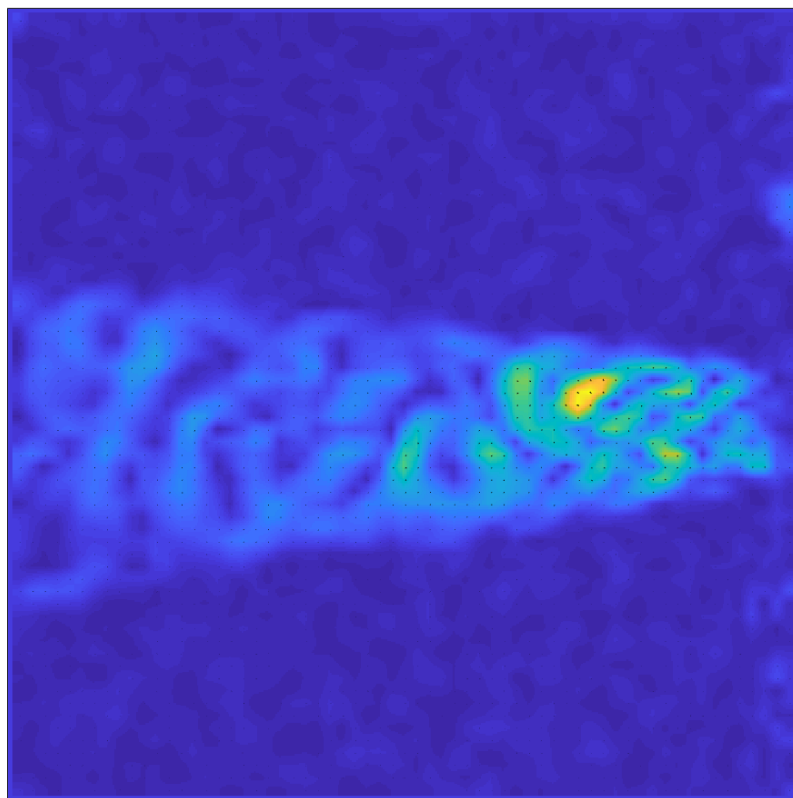


Fig. 4.5 - Cilindro ceramico riscaldato e investito da un flusso d'aria

Come emerge dalla *Fig. 4.5*, pur riuscendo a ottenere delle immagini di maggiore qualità e con un gradiente di densità sufficiente da poter essere raffigurato tramite BOS, la dimensione del cilindro non ci ha permesso di visualizzare in maniera netta i vortici di von Karman, in quanto la loro presenza imperturbata e quindi facilmente visualizzabile, sarebbe stata in regimi di velocità molto più bassi, non raggiungibili dalla galleria del vento che si aveva a disposizione. Quello che si delinea invece è un comportamento tipico dei “corpi tozzi”, con la presenza di una scia consistente e molto evidente nella parte immediatamente successiva al cilindro utilizzato, che va poi a ridurre la propria intensità nella seconda parte dell'immagine (a sinistra), sia per una naturale diminuzione del gradiente di densità tra scia e moto imperturbato a distanze notevoli dal cilindro, sia a causa di una perdita di contrasto data dal raffreddamento dell'aria.

5. Conclusioni

I due sistemi di visualizzazione di un moto fluido studiati in laboratorio rappresentano certamente un valido mezzo per svolgere analisi qualitative e quantitative in vari campi della fluidodinamica, riuscendo anche, in alcune condizioni, a superare tecniche di analisi a particelle traccianti, sia per rapidità e facilità di utilizzo, sia per risultato ottenibile. Nello specifico, la fotografia Schlieren sarà applicata in futuro per effettuare valutazioni d'interesse riguardanti il flap (si veda il paragrafo 3.1.2), avendo essa fornito un'ottima visualizzazione delle condizioni di moto associate al movimento dello stesso, le quali venivano precedentemente svolte inseminando il flusso con un aeriforme di diversa colorazione rispetto all'aria, che permettesse di visualizzare alcune linee di corrente del flusso, esaltando vortici e scie. Tuttavia questa tecnica è per sua natura discontinua, e permette di studiare il moto in brevissimi intervalli successivi (dell'ordine di 1 secondo), aumentando di fatto la difficoltà di analisi e riducendo le informazioni ottenibili. Se è vero che lo Schlieren ha risolto egregiamente questo problema, è vero però che anch'esso introduce alcune problematiche, le quali vanno affrontate e valutate a seconda dell'applicazione che verrà data al sistema. Ciò che rappresenta un punto cardine per la buona riuscita dello Schlieren è sicuramente un preciso set-up, mentre la problematica maggiore è rappresentata dal fenomeno dello sdoppiamento, minimizzabile ma, con la configurazione a uno specchio, mai del tutto eliminabile. Esso fa sì che l'area d'indagine sia molto ristretta e ravvicinata allo specchio concavo e proprio per questo motivo, abbinato anche ai limiti geometrici sulle dimensioni dello specchio, lo Schlieren classico può essere applicato unicamente in analisi di laboratorio, o comunque su fenomeni di piccole dimensioni. Per quanto riguarda il BOS, esso invece ha il grande vantaggio di poter essere applicato anche all'aperto e per indagini su volumi notevoli (si pensi alle perturbazioni causate da aerei in volo), ma ha il difetto di fornire immagini poco significative su fenomeni che causino piccole variazioni di densità (in queste condizioni, lo Schlieren classico è estremamente più sensibile), oppure quando queste variazioni siano concentrate su un piano perpendicolare alla direzione d'integrazione lungo z ; inoltre, il set-up rappresenta un fattore di difficoltà maggiore, non essendo caratterizzato da regole che definiscano in maniera assoluta le distanze tra gli apparecchi in gioco, e non è difficile incorrere in condizioni in cui non si riesce ad estrapolare nulla di significativo dalle immagini da correlare; è da sottolineare tuttavia che, una volta giunti nelle condizioni di massima risoluzione (che nel nostro caso si avevano per $Z_{\text{sfondo-fenomeno}} = 20 \text{ cm}$ e $Z_{\text{fenomeno-camera}} \approx 100 \text{ cm}$, con un'ottica da 70 mm e lo sfondo di figura Fig. 4.2), l'analisi risulta più veloce ed efficace rispetto allo Schlieren classico, essendo essa effettuata direttamente via software. Si conclude dunque l'elaborato mettendo in luce i buoni risultati ottenuti da Schlieren e BOS e sottolineando che, specie per l'ultimo dei due, si hanno margini di miglioramento che potrebbero portare questa tecnica a fornire buoni risultati anche in analisi in galleria del vento.

Bibliografia

- [1] Mazumdar A., 2011, PRINCIPLES AND TECHNIQUES OF SCHLIEREN IMAGING SYSTEMS, Rapporto tecnico , Columbia University, New York, NY, pagine 2-6.
- [2] Degen N., 2012, An Overview on Schlieren Optics and its Applications, Working paper, ETH-Zürich, pagine 1-18.
- [3] Settles G. S., Hargather M. J., 2010, Recent Developments in Schlieren and Shadowgraphy, 27th AIAA Aerodynamic Measurement Technology and Ground Testing Conference, 28 June - 1 July 2010, Chicago, Illinois, USA, pagine 1-13.
- [4] Raffel M., 2015, Background-oriented schlieren (BOS) techniques, Exp Fluids 56, 60 (2015), pagine 1-6.
- [5] METTLER TOLEDO, pagina web, Indice di rifrazione: tutto ciò che occorre sapere.
- [6] Laforgia D., Starace G., 2012, TECNICHE DI ANALISI DEI FLUSSI, Corso di Misure Meccaniche Termiche e Collaudi 5° anno - Ingegneria Meccanica Politecnico di Bari, Politecnico di Bari, pagine 1-13.
- [7] Hartberger E. J., 2011, Background-Oriented Schlieren Pattern Optimization, Thesis, DEPARTMENT OF THE AIR FORCE, AIR UNIVERSITY, AIR FORCE INSTITUTE OF TECHNOLOGY, Wright-Patterson Air Force Base, Ohio, pagine 1-15, 84-88.
- [8] Halse K. H., 1997, On Vortex Shedding and Prediction of Vortex-Induced Vibrations of Circular Cylinders, Tesi di dottorato, Department of Marine Structures, Faculty of Marine Technology Norwegian University of Science and Technology, pagine 21-24.
- [9] Taberlet N., Plihon N., Auzèmer L., Sautel J., Panel G., Gibaud T., 2018, Synthetic Schlieren application to the visualization and characterization of air convection, European Journal of physics, 39 (2018), pagine 1-12.