



**Politecnico  
di Torino**

# DETERMINAZIONE DEL NUMERO DI REYNOLDS, DELLA LUNGHEZZA D'ONDA E DELLA VELOCITÀ DI FASE IN GETTI INSTABILI E TURBOLENTI, VISUALIZZATI TRAMITE FUMO BIANCO

Metodi ottici, video e immagini realizzati con camera reflex Nikon D3500 e smartphone Samsung A52s, analizzati con software di post-processing Tracker (OSP, [www.phylets.org](http://www.phylets.org)), Paint (Microsoft Corporation), Microsoft Excel (Microsoft Corporation).

Esercitazione svolta il 10/11/2023 nell'aula 3N del Politecnico di Torino.

RELAZIONE, PRESENTAZIONE, VALUTAZIONE E ANALISI DEI RISULTATI svolti da:

**Gruppo 1:**

Li Causi Gaspare 301756

Patrucco Marco 310320

Simone Nicoletta 305418

Talamucci Tommaso 309309

Tressoldi Elisa 315313

**Gruppo 2:**

Dedola Jacopo 308235

Gangarossa Calogero 308378

Sicca Beatrice 312067

Feltrin Matteo

Lazzarin Elena

**Laboratorio Didattico del Corso di Flussi Turbolenti  
Anno accademico 2023/2024**

## Sommario

Introduzione .....	3
Setup sperimentale .....	3
Dati ambiente .....	3
Esperimento 1: Un pennacchio di aria calda visualizzato mediante fumo bianco .....	4
Gruppo 1 .....	4
Visualizzazione 1 .....	5
Visualizzazione 2 .....	5
Visualizzazione 3 .....	6
Visualizzazione 4 .....	6
Gruppo 2 .....	6
Risultati .....	7
Esperimento 2: Un getto di aria espirato visualizzato mediante fumo bianco .....	9
PIVlab .....	9
Output PIVlab .....	10
Velocity Magnitude .....	10
Vortex Locator .....	11
Vorticity .....	11
Vectors Velocity .....	12
Validazione con Tracker .....	12
Considerazioni .....	14
Note: commento su errore sistematico associato alle tecniche di visualizzazione mediante fumi	15

## Introduzione

Sono stati condotti due differenti esperimenti in condizioni ambientali pressoché simili. Nel primo esperimento la sigaretta, una volta accesa, è stata lasciata bruciare autonomamente durante le visualizzazioni, in condizioni il più possibile vicine ad aria calma. Nel secondo esperimento, veniva visualizzato il fumo espirato da uno studente.

L'obiettivo del lavoro è ricavare il numero di Reynolds, la lunghezza d'onda e la velocità di fase dei flussi turbolenti visualizzati tramite fumo di sigaretta.

$\lambda$	Lunghezza d'onda
$V$	Velocità di fase
$Re$	Numero di Reynolds
$T$	Temperatura
$\rho$	Densità
$\mu$	Viscosità dinamica

Tabella 1. Lista di simboli utilizzati

## Setup sperimentale

La strumentazione utilizzata per svolgere l'esperimento è la seguente:

- Sigarette
- Fotocamera digitale: reflex Nikon D3500
- Ottica: AF-P DX 18-55
- Treppiede
- Smartphone: Samsung A52s e Iphone 13
- Righello da 15 cm
- Fondali scuri per favorire una buona visualizzazione del fumo

## Dati ambiente

Partendo dalle condizioni ambiente i dati sono mostrati in tabella:

GRANDEZZA	VALORE	UNITA' DI MISURA
$T$	23	°C
$\rho$	1,20	Kg/m <sup>3</sup>
$\mu$	1,83e-5	Pa*s

La densità è stata determinata mediante l'atmosfera ISA, tenendo in considerazione la quota altimetrica di Torino pari a 250 m.

Per quanto riguarda la viscosità dinamica è stata utilizzata la formula di Sutherland, che tiene in considerazione la temperatura dell'aula.

$$\mu = S * \left( \frac{T^{\frac{3}{2}}}{X + T} \right)$$

Con S e  $\chi$  costanti tipiche del gas, per l'aria pari a  $S = 1,46 \cdot 10^{-6} \frac{kg}{msK^{\frac{3}{2}}}$  e  $\chi = 110$  K.

## Esperimento I: Un pennacchio di aria calda visualizzato mediante fumo bianco

Si osserva il fumo emesso da una sigaretta lasciata bruciare autonomamente.

Il primo esperimento è stato eseguito diverse volte e sono stati prodotti diversi video. Ne sono stati selezionati cinque, sui quali sono state eseguite le analisi. Al fine di validare i risultati ottenuti, si è deciso di dividere il lavoro in due gruppi autonomi e indipendenti tra loro, utilizzando due tecniche differenti di analisi.

### Gruppo 1

Il primo gruppo è ricorso al software Tracker. Con un righello virtuale si è andati a determinare la distanza tra due creste successive, ovvero lunghezza d'onda ( $\lambda$ ). Tracciando lo spostamento della cresta in frame successivi, è stata valutata la distanza  $\Delta x$  percorsa in ogni frame, la quale poi, divisa per il tempo che intercorre tra un frame e il successivo ( $\Delta t$ ), ha permesso di valutare la velocità di fase dell'onda ( $V$ ). Nota  $V$  e misurando la lunghezza di riferimento  $L$  (distanza della prima cresta dal punto di combustione della sigaretta) si è calcolato il numero di Reynolds in due modi diversi:

$$Re_1 = \frac{\rho V L}{\mu} \qquad Re_2 = \frac{\rho V \lambda}{\mu}$$

Dove:

- $Re_1$  è il numero di Reynolds calcolato prendendo come lunghezza di riferimento la distanza tra la sorgente e il primo punto in completa turbolenza;
- $Re_2$  è il numero di Reynolds calcolato prendendo come lunghezza di riferimento la lunghezza d'onda.

Infine, il post-processing è stato eseguito su Excel.

Si riportano sotto le immagini da cui sono state prese le misure.

Visualizzazione 1

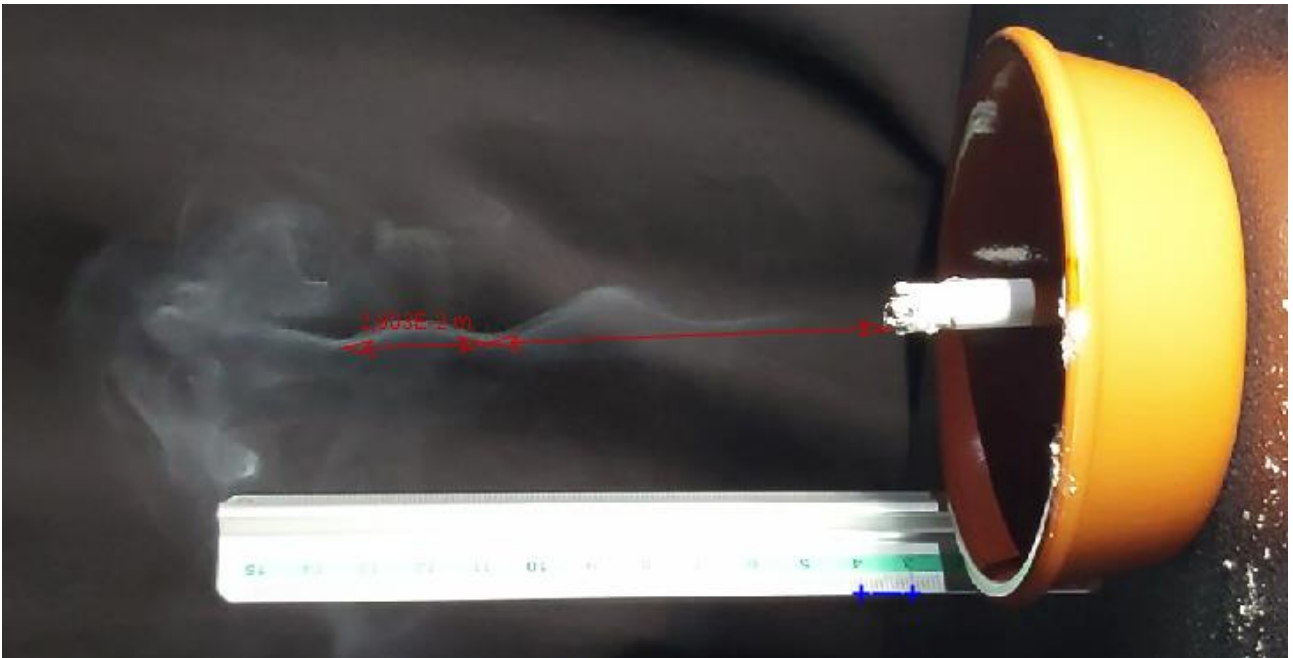


Figura 1: Immagine estratta dal video 20231110\_122517.trk - frame 56

Visualizzazione 2

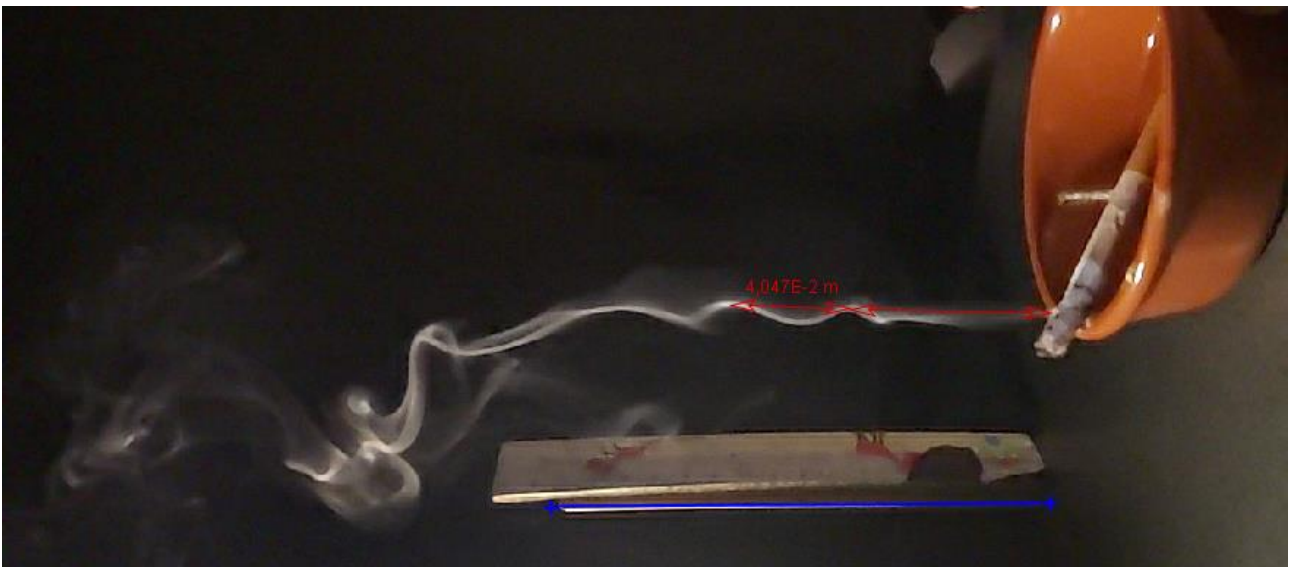


Figura 2: Immagine estratta dal video 20231110\_123202.trk - frame 174

### Visualizzazione 3

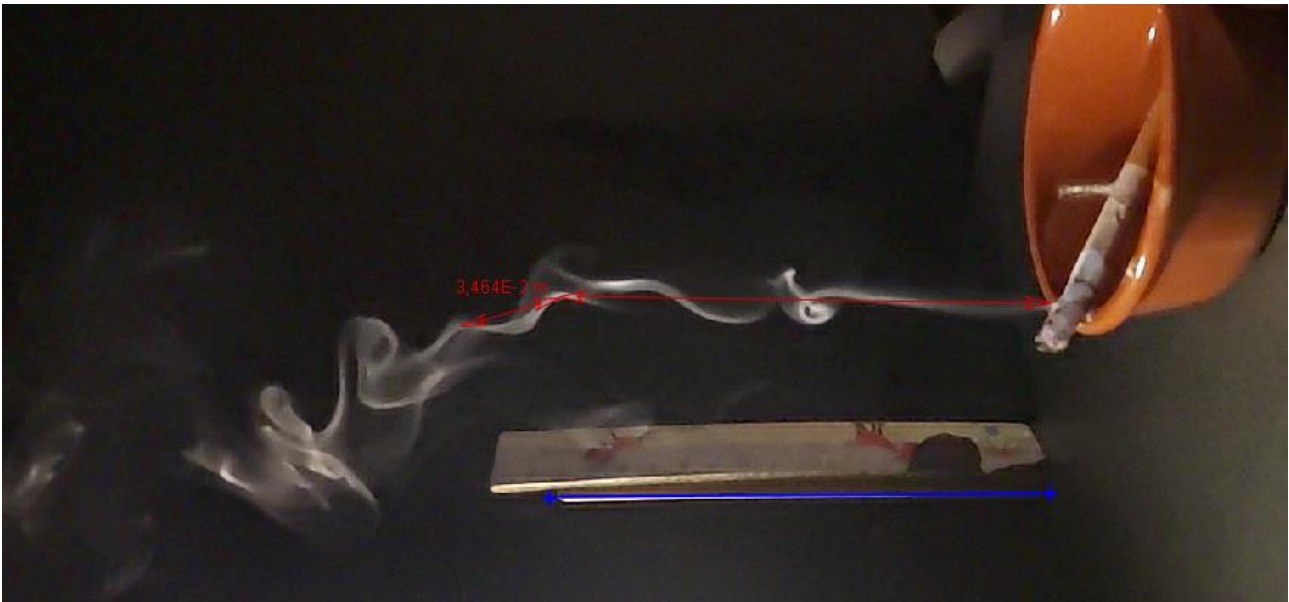


Figura 3: Immagine estratta dal video 20231110\_123202.trk - frame 220

### Visualizzazione 4

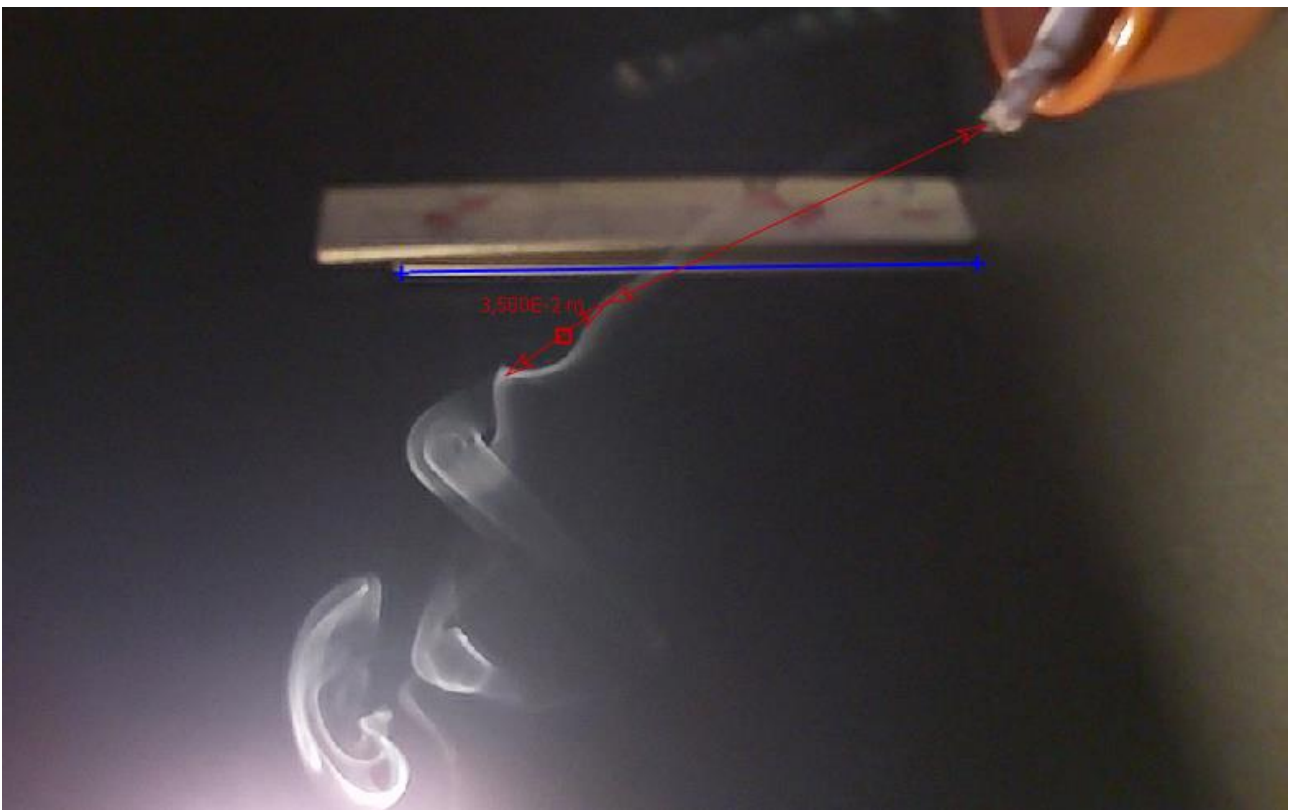


Figura 4: Immagine estratta dal video 20231110\_123235.trk - frame 91

### Gruppo 2

Il secondo gruppo, invece, utilizzando un ingrandimento sufficiente, ha in primo luogo valutato quanti pixels sono contenuti all'interno di un millimetro:

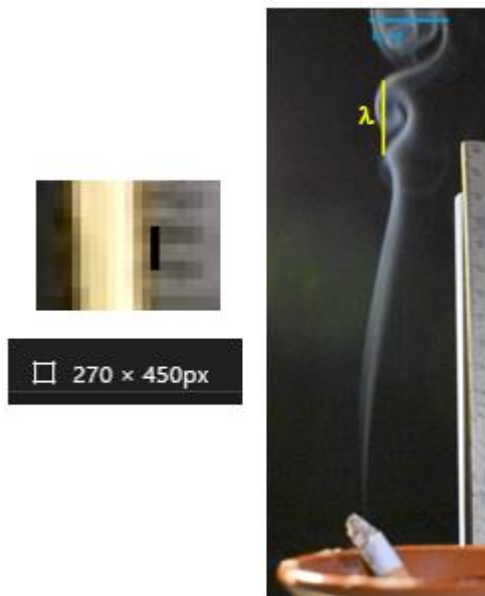
$$1 \text{ mm} = 4 \text{ pixels}$$

In questo modo, è stato possibile andare a valutare, tramite il *software Paint* e la scala graduata presente nei filmati, la distanza tra due creste successive (lunghezza d'onda  $\lambda$ ). Successivamente, misurato l'intervallo temporale ( $\Delta t$ ) impiegato da una cresta per percorrere tale distanza, è stato possibile valutare la velocità di fase ( $v$ ) e, infine, il numero di Reynolds:

$$Re = \frac{\rho V \lambda}{\mu}$$

Infine, il post-processing è stato eseguito su Excel.

Si riporta un'immagine rappresentativa del metodo utilizzato.



## Risultati

I risultati sono riportati nella tabella sottostante.

N° Visual.	Gruppo 1				Gruppo 2		
	1	2	3	4	5	6	7
$\lambda$ [m]	2.90E-02	4.05E-02	3.46E-02	3.58E-02	3.20E-02	3.00E-02	3.84E-02
$v$ [m/s]	1.70E-02	1.53E-02	1.80E-02	1.27E-02	1.14E-02	1.80E-02	1.37E-02
$L$ [m]	1.21E-01	2.42E-01	2.53E-01	2.75E-01			
$Re_1$	1.34E+02	2.41E+02	2.97E+02	2.27E+02			
$Re_2$	3.22E+01	4.03E+01	4.06E+01	2.96E+01	2.38E+01	3.53E+01	3.43E+01

Tabella 2: Risultati ottenuti dai due gruppi di lavoro. In particolare,  $Re_1$  è calcolato prendendo come lunghezza di riferimento la distanza della prima cresta dal punto di combustione della sigaretta, mentre  $Re_2$  considera la lunghezza d'onda.

Si riportano i significati delle grandezze presenti:

- La *lunghezza d'onda* corrisponde alla distanza tra due creste o tra due ventri della sua forma d'onda;
- $L$  è la distanza della prima cresta dal punto di combustione della sigaretta;
- La *velocità di riferimento* è la velocità di avanzamento dell'onda, calcolata come  $V = \frac{\Delta x}{\Delta t}$ .

- Il numero di Reynolds è il valore adimensionale calcolato come  $Re = \frac{\rho V L_{[ref]}}{\mu}$ ;

Dalla rappresentazione dei valori puntuali e dell'ensemble average si osserva un andamento di tipo randomico delle grandezze, come era possibile aspettarsi. Questo è dovuto sia al fatto che le misure sono state condotte da persone diverse ma soprattutto alla natura caotica della turbolenza.

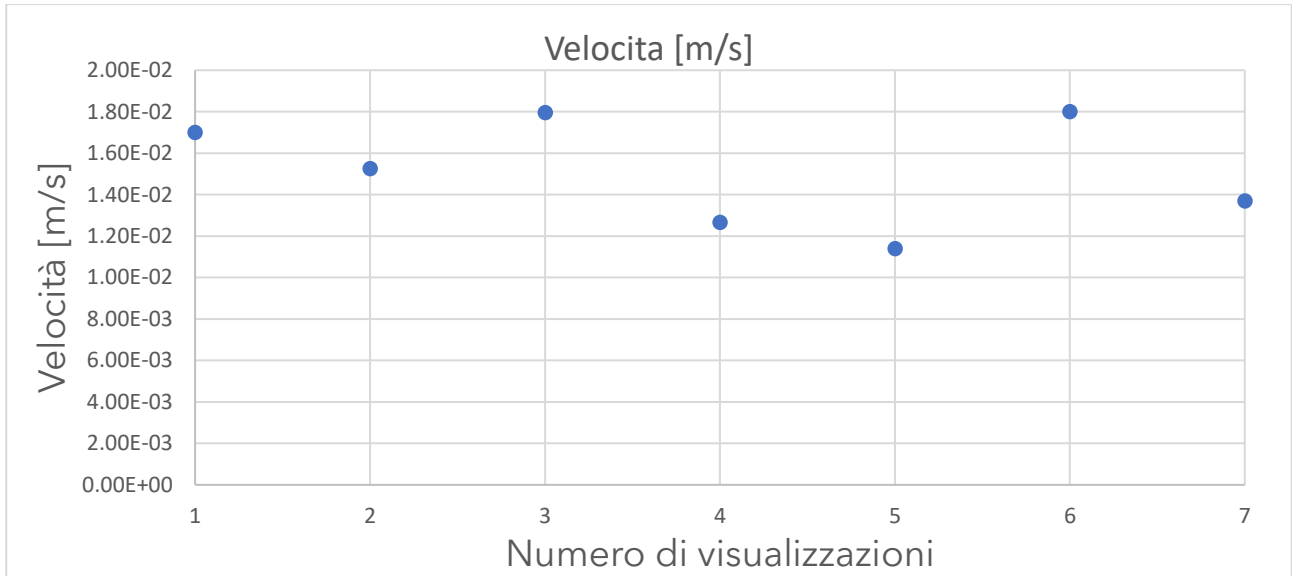


Tabella 3 : distribuzione delle velocità calcolate per le diverse visualizzazioni dei gruppi

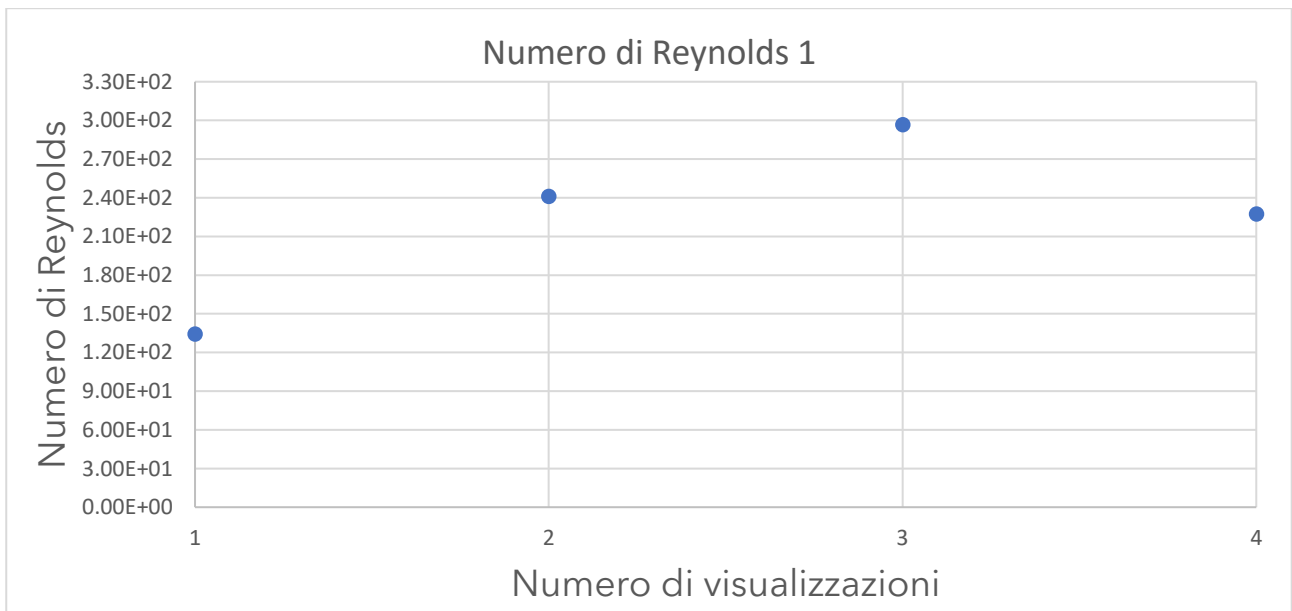


Tabella 4 : distribuzione di Reynolds calcolati con la distanza del punto di transizione a flusso turbolento dal punto di combustione della sigaretta dal gruppo 1 per le diverse visualizzazioni



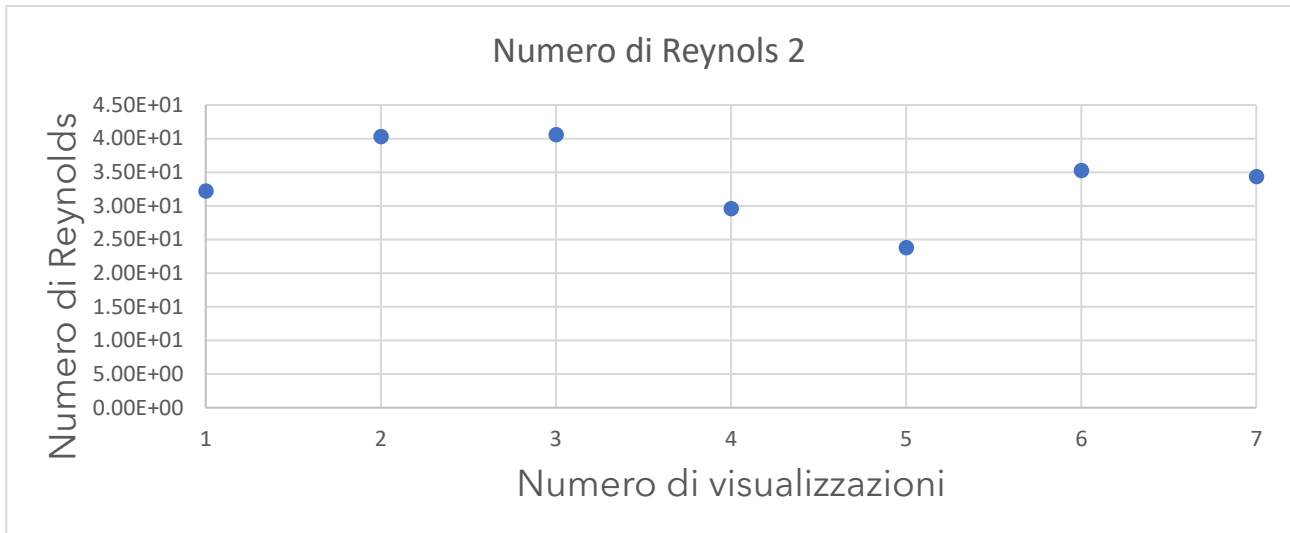


Tabella 5 : distribuzione dei numeri di Reynolds calcolati prendendo come lunghezza di riferimento la lunghezza d'onda per le diverse visualizzazioni dei gruppi

## Esperimento 2: Un getto di aria espirato visualizzato mediante fumo bianco

Per il secondo esperimento, si osserva il getto di fumo di sigaretta. In questo caso, poiché il fumo è stato espirato, vi è un'immediata transizione a turbolenza. Anche in questo caso sono stati effettuati diversi video e si è deciso di analizzare gli stessi tramite PIV.

### PIVlab

La tecnica utilizzata affinché si potessero ottenere dei dati legati anche all'istante temporale è quella della PIV (*Particle Image Velocimetry*). Si tratta di una tecnica ottica non invasiva, che consente di valutare campi istantanei di velocità caratterizzati da un elevato numero di vettori velocità.

I dati che si acquisiscono sono delle immagini ottenute tramite telecamera e sono stati analizzati facendo uso del Tool di Matlab PIVlab. Importando il video è possibile procedere con delle operazioni di pre-processing:

- Definizione dei frame da analizzare;
- Calibrazione, effettuata prendendo come riferimento la dimensione del naso;
- Definizione della maschera, in modo da oscurare le zone che non collaborano all'analisi così da diminuire il costo computazionale ed evitare di avere delle zone spurie che potrebbero alterare i risultati;
- Definizione dell'area di interrogazione, ovvero un'area costituita da un certo numero di pixel. Essa deve essere sufficientemente piccola, in modo da poter ritenere il flusso uniforme e avere anche uno spostamento considerato uniforme; allo stesso tempo non deve essere troppo grande, in quanto si perderebbe la descrizione dettagliata del campo.

Al termine di questa fase di inizializzazione, si può procedere facendo partire l'analisi e, successivamente, mediante il tool Matlab effettuare il post-processing che fornisce i risultati tramite immagini.

Vengono riportati gli output, in forma grafica, ottenuti tramite il tool di Matlab di cui si sta facendo uso. Bisogna precisare che le condizioni in cui l'esperimento è stato svolto non erano quelle ideali per poter effettuare un corretto studio con la tecnica PIV. Infatti, essa richiede che vengano inserite all'interno del flusso delle particelle con caratteristiche ben definite e in grado di seguire fedelmente il moto del flusso; allo stesso tempo, il flusso deve essere attraversato da un fascio laser che crei una lama di luce, in modo da illuminare le particelle. Consci di questi aspetti fondamentali per la buona riuscita dell'analisi PIV, è stato comunque deciso di proseguire, affinché si potessero ottenere delle visualizzazioni più qualitative. Gli ordini di grandezza sono poi stati confrontati nuovamente con il metodo tracker. In questo modo, tramite i dati più corretti ottenuti via Tracker, è stato possibile andare anche ad effettuare una stima del numero di Reynolds per questo secondo esperimento.

## Output PIVlab

### Velocity Magnitude

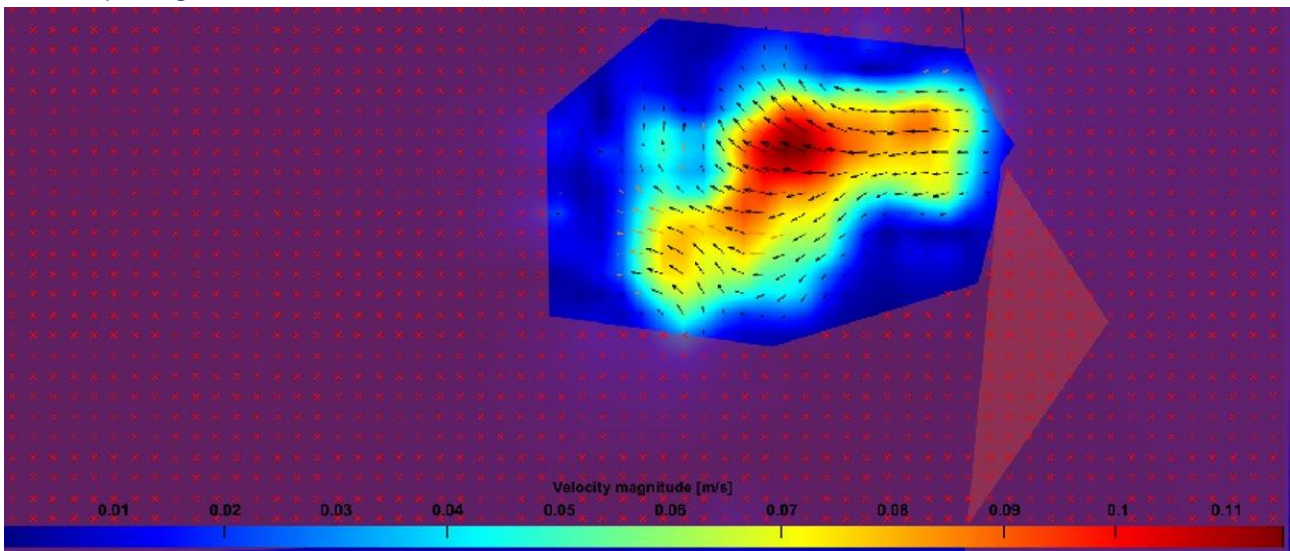


Figura 6 : Distribuzione dei moduli di velocità ottenuta tramite PIV

Si vede che la velocità massima del getto viene raggiunta in prossimità della sorgente del getto e tende poi a diminuire man mano che ci si sposta più lontani da questa ma anche man mano che ci si allontana dall'asse del getto.

## Vortex Locator

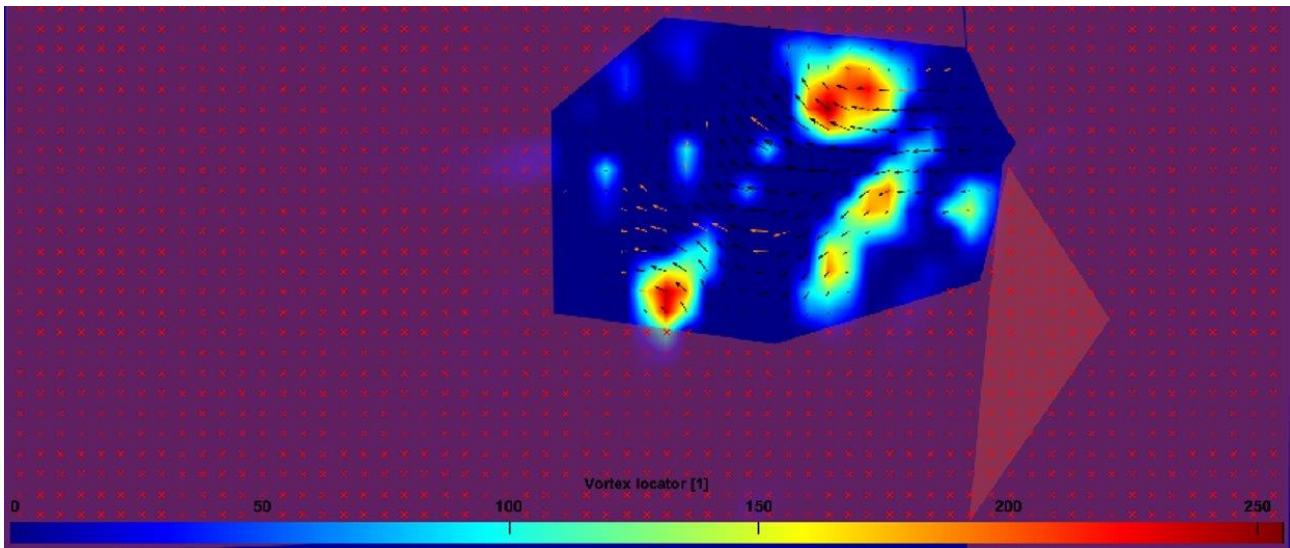


Figura 7: Vortex Locator ottenuto tramite PIV

## Vorticity

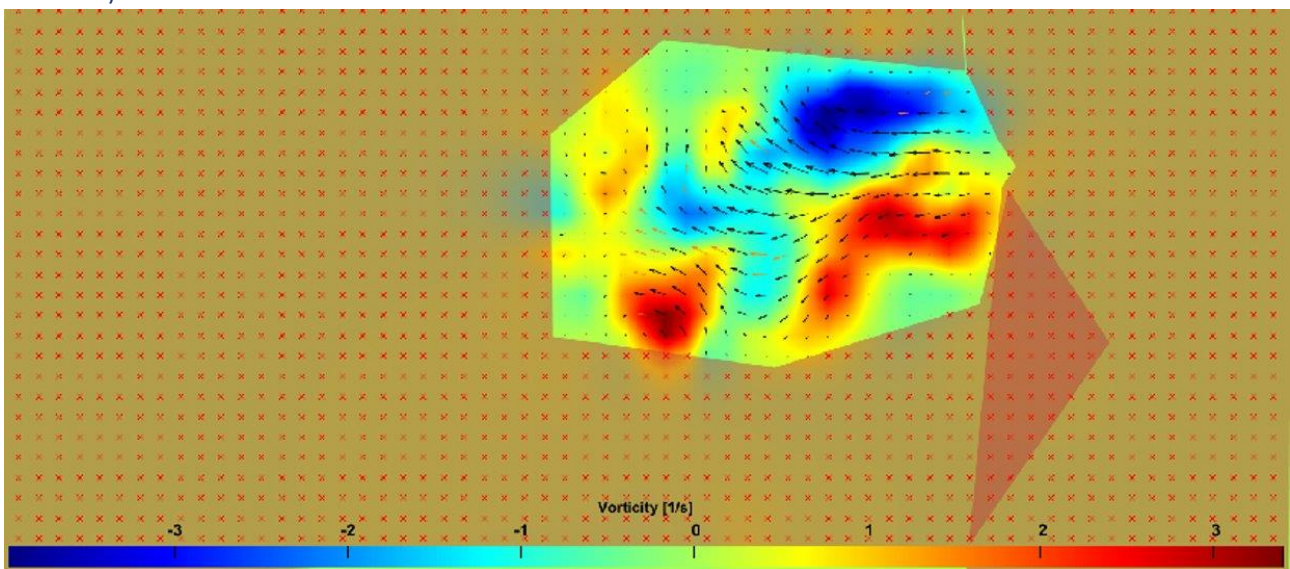


Figura 8: Andamento della vorticità ottenuto tramite PIV

È possibile visualizzare la presenza di due vortici contro rotanti, uno in senso orario (nell'immagine sopra in blu) e uno in senso antiorario (nell'immagine sopra in rosso), come ci si potrebbe aspettare.

## Vectors Velocity

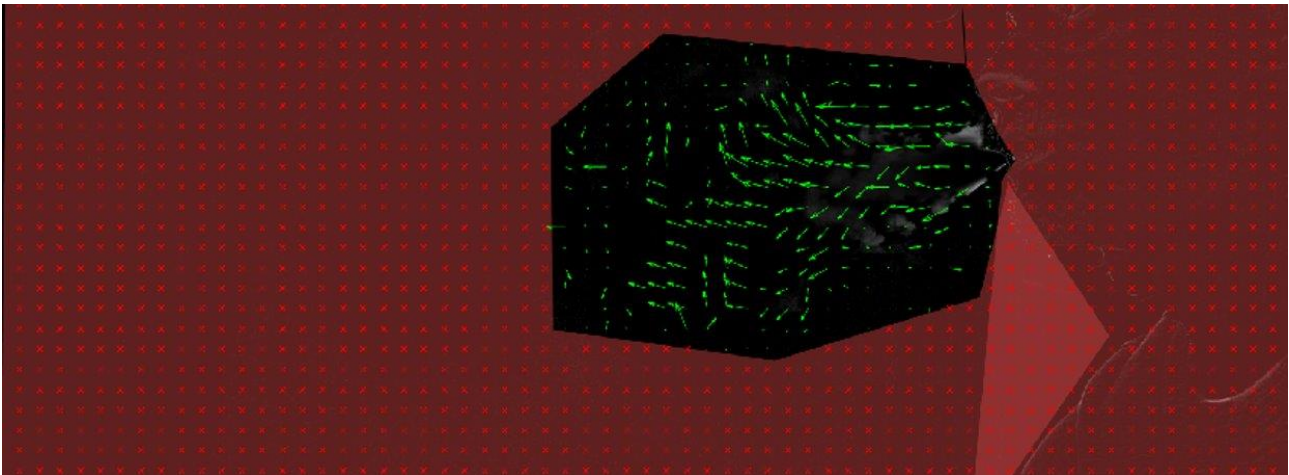


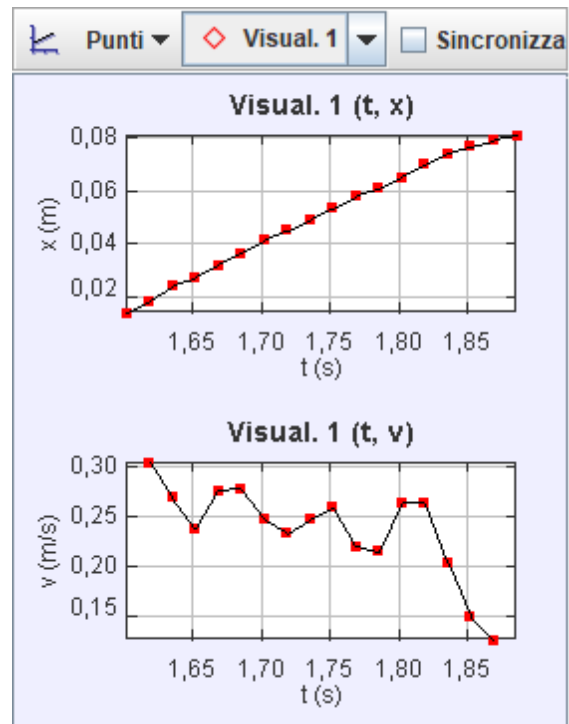
Figura 9 : andamento qualitativo dei vettori velocità ottenuto tramite PIV

L'immagine sopra è una pura rappresentazione grafica qualitativa dell'andamento dei vettori velocità.

## Validazione con Tracker

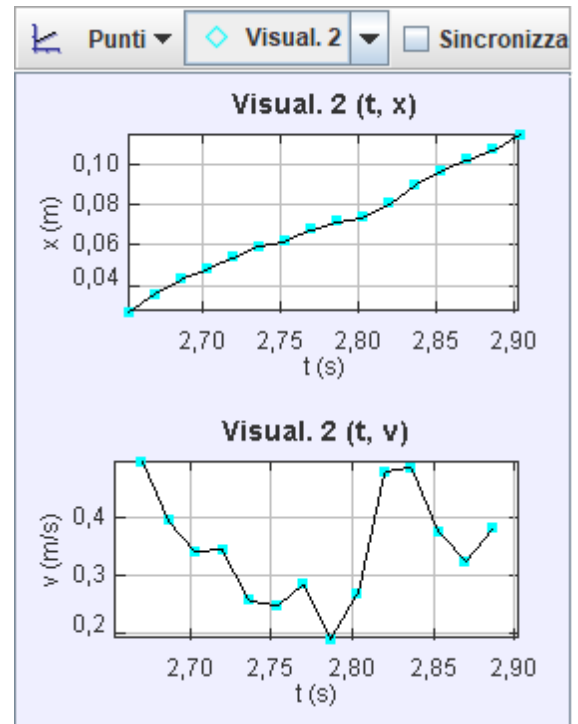
È stata svolta in parallelo all'analisi PIV un'analisi visiva con tracker, così da validare i risultati ottenuti. Per farlo è stato monitorato l'andamento nello spazio per ogni frame del fronte d'onda del getto espirato. Successivamente sapendo la durata di ogni singolo frame, è stato possibile valutarne la velocità. Questa operazione è stata svolta in 3 parti differenti del video così da poter ottenere dei dati d'insieme.

Visual. 1		
t [s]	x [m]	v [m/s]
1.60	1.47E-02	
1.62	1.88E-02	3.06E-01
1.63	2.45E-02	2.71E-01
1.65	2.78E-02	2.38E-01
1.67	3.24E-02	2.78E-01
1.69	3.70E-02	2.79E-01
1.70	4.16E-02	2.49E-01
1.72	4.53E-02	2.34E-01
1.74	4.94E-02	2.49E-01
1.75	5.36E-02	2.60E-01
1.77	5.80E-02	2.21E-01
1.79	6.10E-02	2.16E-01
1.80	6.52E-02	2.65E-01
1.82	6.98E-02	2.65E-01
1.84	7.41E-02	2.04E-01
1.85	7.66E-02	1.49E-01

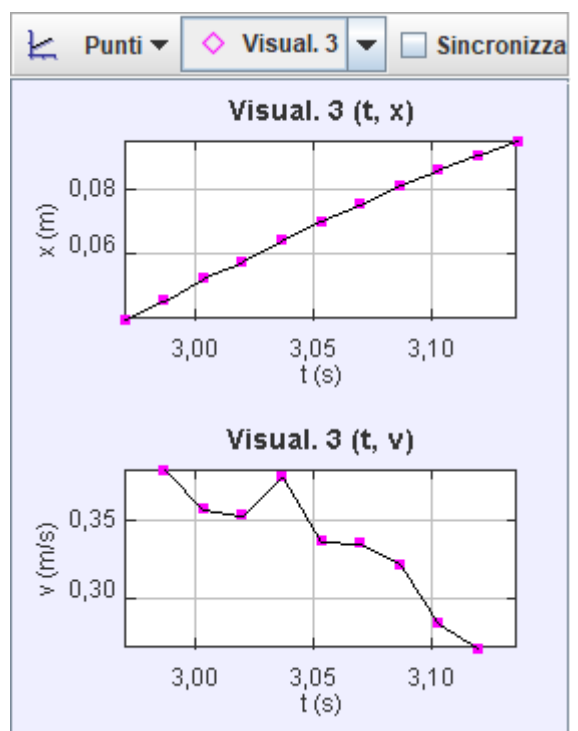


1.87	7.90E-02	1.27E-01
1.89	8.09E-02	

Visual. 2		
t [s]	x [m]	v [m/s]
2.65	2.73E-02	
2.67	3.59E-02	4.98E-01
2.69	4.32E-02	3.96E-01
2.70	4.84E-02	3.43E-01
2.72	5.39E-02	3.46E-01
2.74	5.95E-02	2.59E-01
2.75	6.22E-02	2.50E-01
2.77	6.76E-02	2.87E-01
2.79	7.17E-02	1.93E-01
2.80	7.38E-02	2.71E-01
2.82	8.04E-02	4.81E-01
2.84	8.97E-02	4.87E-01
2.85	9.66E-02	3.75E-01
2.87	1.02E-01	3.25E-01
2.89	1.07E-01	3.83E-01
2.90	1.15E-01	



Visual. 3		
t [s]	x [m]	v [m/s]
2.97	4.03E-02	
2.99	4.59E-02	3.84E-01
3.00	5.27E-02	3.58E-01
3.02	5.77E-02	3.54E-01
3.04	6.43E-02	3.79E-01
3.05	7.01E-02	3.37E-01
3.07	7.53E-02	3.36E-01
3.09	8.11E-02	3.22E-01
3.10	8.58E-02	2.83E-01
3.12	9.04E-02	2.68E-01
3.14	9.47E-02	



Al fine di calcolare il numero di Reynolds, si è fatta una media d'insieme per determinare una velocità di riferimento, mentre come lunghezza di riferimento è stata presa la distanza dalla sorgente del getto. I valori calcolati sono riportati nella tabella sottostante:

N° Visual.	1	2	3
V [m/s]	2.38E-01	3.50E-01	3.36E-01
L [m]	1.29E-01	1.41E-01	1.07E-01
Re	2.01E+03	3.22E+03	2.34E+03

## Considerazioni

È necessario considerare la presenza di perturbazioni date dai respiri e movimenti delle persone presenti in aula. È bene prendere in considerazione errori umani nella scelta dei punti che rappresentano le creste delle semionde, oltre alla imprecisione nella strumentazione. Per quanto riguarda il risultato ottenuto, un altro fattore di errore è contenuto nelle differenti possibilità di scelta della lunghezza di riferimento. Tuttavia, anche cambiando questo valore si nota come non ci siano variazioni nell'ordine di grandezza ottenuto.



## Note: commento su errore sistematico associato alle tecniche di visualizzazione mediante fumi

*Cimbala J. M., Nagib H. M., Roshko A. (1988). Large structure in the far wakes of two-dimensional bluff bodies. Journal of Fluid Mechanics, 190, 265-298.*

Si deve considerare il fatto che la validità dell'esperimento è inficiata dal fenomeno descritto qui di seguito.

Il fumo nell'aria è in realtà composto da minuscole particelle di tipo aerosol, la cui massa è notevolmente maggiore della massa delle molecole dell'aria circostante; per questo motivo, la diffusione di queste particelle è estremamente lenta a livello di scala molecolare. Possiamo allora definire un numero di Schmidt che è ordini di grandezza maggiore di quello della sola aria. Lapple (1961) ha calcolato il coefficiente di diffusione  $D$  del particolato nell'aria a 25 C°. Per fumi la cui dimensione delle particelle è di circa 0,2  $\mu\text{m}$  calcola un coefficiente di diffusione di circa  $2 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$ . In aria, la viscosità cinematica  $\nu$  è pari a 0,16  $\text{cm}^2/\text{s}$ , di conseguenza il nostro numero di Schmidt  $\nu/D$  è dell'ordine 105.