

Visualizzazione di plume calda instabile e getto turbolento per mezzo di fumi bianchi

Analisi statistica

Corso Flussi Turbolenti
Coorte 2024/2025
Laboratorio Fisica 3 – DISAT
29/11/2024

Indice

Capitolo 1: Plume instabile (Re dell'ordine di 10^2)

1.1 Tabelle con dati (DL, Dt, lambda, omega,)

1.2 Analisi statistica e diagrammi

1.3 Collezione dei filmati

Capitolo 2: Getto turbolento (Re dell'ordine di 10^4)

2.1 Tabelle con dati (DL, Dt, lambda, omega,)

2.2 Risultati

2.3 Collezione dei filmati

Capitolo 3: Conclusioni

Capitolo 4: Appendice

0 - Introduzione all'esperimento

Il giorno 29/11/2024, presso il Laboratorio di Fisica 3 del DISAT al Politecnico di Torino, sono state condotte diverse **visualizzazioni sperimentali di un pennacchio caldo** *derivante dalla combustione di una sigaretta*.

Nello specifico, tale pennacchio è generato dal trasporto delle particelle rilasciate durante la combustione di una sigaretta: tra di esse, si è determinato che il fumo contenesse:

- Benzene;
- Formaldeide;
- Polonio 210.

0 - Introduzione all'esperimento

Successivamente tali visualizzazioni sperimentali sono state ripetute per l'**emissione di un getto turbolento** *generato a partire dall'inalazione e conseguente rilascio del fumo di sigaretta*.

Nel corso delle numerose visualizzazioni, diversi studenti hanno registrato con il proprio dispositivo cellulare i fenomeni osservati al fine di svolgere un'analisi statistica dei dati. Si riportano nelle diapositive successive i risultati a cui si è arrivati.

1 - Plume instabile



Obiettivo: valutazione del numero di Reynolds del flusso tramite l'analisi di piccole fluttuazioni

Link video:
[Instabilita.mp4](#)



Link video:
[eleonora_zulli_incenso1_s330010.mp4](#)

1.1 – Tabelle con dati

	Dati						
	mm	s	mm/s	mm	s-1	/	mm ² /s
	DL	DT	c_fase	lambda	omega	Re	nu
1		0,16	160	25	39,27	81,97	4,88E-05
2		0,12	160	19	52,36	62,3	4,88E-05
3		0,121	130	15,7	52,88	26	8,21E-05
4		0,121	140	16,2	55	27	8,21E-05
5		0,121	150	18	53	35	8,21E-05
7		0,14	190	26	44	61	8,21E-05
8		0,13	190	25	47,6	57	8,21E-05
9		0,11	180	19	58	43	8,21E-05
10		0,1	230	20	63	58	8,40E-05
11	3,5	0,06	348	21	105	295	9,48E-05
12		0,149	84	12,4	42	48	2,20E-05
13	57	0,17	335	27	78	187	4,88E-05
14	52	0,15	312	25	79	159	4,88E-05
15	34	0,15	256	16	103	84	4,88E-05
16	68	0,17	395	25	101	199	4,88E-05
17	63	0,17	405	31	83	253	4,88E-05

Nella tabella a sinistra vengono riportati i dati sperimentali ottenuti attraverso la rielaborazione dei filmati registrati durante l'esperimento. Ciascun blocco colorato corrisponde all'insieme di rielaborazioni proposte da un singolo studente partecipante all'esperimento, e al fine di determinare il numero di Reynolds Re sono stati calcolati sperimentalmente i seguenti parametri:

- Δ_L : Rappresenta la **lunghezza caratteristica del singolo vortice di fumo**, misurato in [mm];
- Δ_T : Rappresenta **l'intervallo di tempo caratteristico** in cui il **singolo vortice di fumo si sviluppa**: è stato misurato in [s] a partire da considerazioni sui *frames per seconds* dei filmati;
- C_{fase} : Rappresenta la **velocità caratteristica di propagazione del singolo vortice di fumo**: è stata misurata in [mm/s];

1.1 – Tabelle con dati

	Dati						
	mm	s	mm/s	mm	s-1	/	mm ² /s
	DL	DT	c_fase	lambda	omega	Re	nu
1		0,16	160	25	39,27	81,97	4,88E-05
2		0,12	160	19	52,36	62,3	4,88E-05
3		0,121	130	15,7	52,88	26	8,21E-05
4		0,121	140	16,2	55	27	8,21E-05
5		0,121	150	18	53	35	8,21E-05
7		0,14	190	26	44	61	8,21E-05
8		0,13	190	25	47,6	57	8,21E-05
9		0,11	180	19	58	43	8,21E-05
10		0,1	230	20	63	58	8,40E-05
11	3,5	0,06	348	21	105	295	9,48E-05
12		0,149	84	12,4	42	48	2,20E-05
13	57	0,17	335	27	78	187	4,88E-05
14	52	0,15	312	25	79	159	4,88E-05
15	34	0,15	256	16	103	84	4,88E-05
16	68	0,17	395	25	101	199	4,88E-05
17	63	0,17	405	31	83	253	4,88E-05

- Lambda: Rappresenta la **lunghezza d'onda caratteristica del singolo vortice di fumo**, misurata in [mm] ;
- Omega: Rappresenta **la frequenza caratteristica con cui si manifesta un vortice di fumo rispetto al precedente**: tale parametro è stato misurato in [Hz] (o [s⁻¹]) a partire da considerazioni sui *frames per seconds* dei filmati;
- Nu: Rappresenta la **viscosità cinematica dell'aria**, misurata in [mm²/s] e valutata a diverse temperature a seconda della regione in cui si è sviluppato il vortice d'interesse; essa risulterà fondamentale per determinare il Reynolds associato a ciascuna misurazione.

1.2 – Analisi statistica e diagrammi

Distribuzione normale							
	mm	s	mm/s	mm	s-1	/	m2/s
	DL	DT	c_fase	lambda	omega	Re	nu
1	0,00	9,18	0,00	0,06	0,01	0,00	14427,65
2	0,00	12,34	0,00	0,07	0,02	0,00	14427,65
3	0,00	12,54	0,00	0,04	0,02	0,00	13577,34
4	0,00	12,54	0,00	0,05	0,02	0,00	13577,34
5	0,00	12,54	0,00	0,06	0,02	0,00	13577,34
7	0,00	13,55	0,00	0,05	0,01	0,00	13577,34
8	0,00	13,73	0,00	0,06	0,01	0,00	13577,34
9	0,00	9,82	0,00	0,07	0,02	0,00	13577,34
10	0,00	6,94	0,00	0,08	0,02	0,00	12490,10
11	0,00	0,52	0,00	0,08	0,00	0,00	6595,80
12	0,00	12,07	0,00	0,02	0,01	0,00	2206,46
13	0,02	6,31	0,00	0,04	0,02	0,00	14427,65
14	0,02	11,84	0,00	0,06	0,02	0,00	14427,65
15	0,02	11,84	0,00	0,05	0,00	0,00	14427,65
16	0,01	6,31	0,00	0,06	0,01	0,00	14427,65
17	0,01	6,31	0,00	0,01	0,01	0,00	14427,65

Deviazione standard	21,9	0,0	97,3	4,9	21,7	82,9	2,04E-05
Mediana	54,5	0,135	190	20,5	56,5	61,65	6,55E-05
Media	46,25	0,13	229,1	21,3	66,0	104,8	6,5E-05
Media w/o outlier	51,5	0,14	226,9	21,3	65,1	96,8	6,6E-05
	11%	2%	-1%	0%	-1%	-8%	1%

A partire dai dati presentati nella diapositiva precedente, è stato possibile **effettuare delle considerazioni statistiche attraverso un foglio di calcolo Excel**. Si sono determinati, nello specifico:

- **Deviazione standard:** tale parametro rappresenta un indice di dispersione statistica, ossia permette di valutare la variabilità del pool di dati raccolti;
- **Mediana:** tale parametro rappresenta il valore intermedio rispetto agli estremi del pool di dati raccolti;
- **Media:** tale parametro indica il rapporto tra la somma dei dati numerici ed il numero di dati;
- **Media senza outlier:** tale parametro rappresenta anch'esso una media, tuttavia depurata dai valori di "picco" e di minimo che potrebbero compromettere le considerazioni statistiche riportate in seguito.

1.2 – Analisi statistica e diagrammi

Errore assoluto (in modulo) con reference con la media								
	mm	s	mm/s	mm	s-1	/	m2/s	
	DL	DT	c_fase	lambda	omega	Re	nu	
1		20%	30%	17%	41%	22%	25%	26%
2		10%	30%	11%	21%	41%	25%	23%
3		10%	43%	26%	20%	75%	27%	34%
4		10%	39%	24%	17%	74%	27%	32%
5		10%	35%	16%	20%	67%	27%	29%
7		5%	17%	22%	33%	42%	27%	24%
8		3%	17%	17%	28%	46%	27%	23%
9		18%	21%	11%	12%	59%	27%	25%
10		25%	0%	6%	5%	45%	30%	19%
11	92%	55%	52%	2%	59%	182%	47%	70%
12		11%	63%	42%	36%	54%	66%	46%
13	23%	27%	46%	27%	18%	78%	25%	35%
14	12%	12%	36%	17%	20%	52%	25%	25%
15	26%	12%	12%	25%	56%	20%	25%	25%
16	47%	27%	72%	17%	53%	90%	25%	47%
17	36%	27%	77%	45%	26%	141%	25%	54%
	40%	18%	37%	20%	29%	68%	30%	

Si è infine svolta un'analisi statistica seguendo il **metodo della media di insieme**: è stato così possibile valutare quanto il valore della singola misurazione si discostasse dal valore medio previsto dalla distribuzione normale.

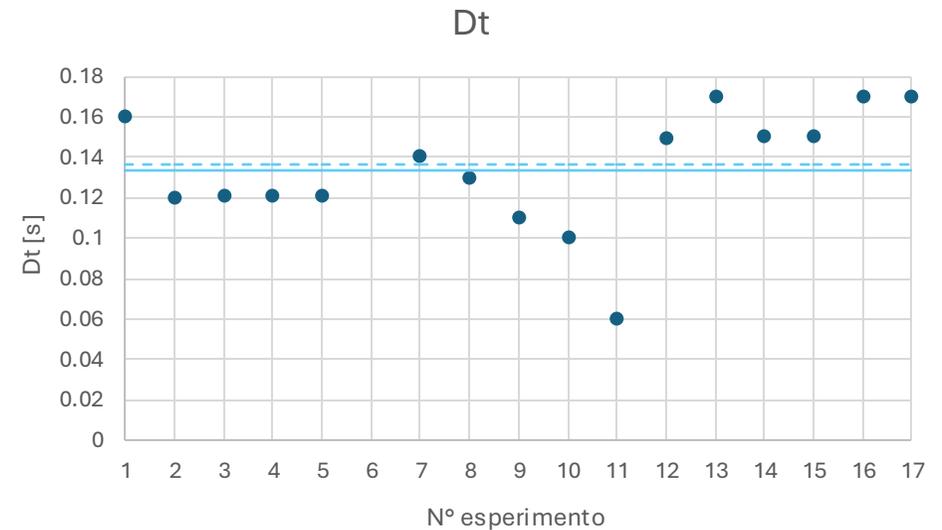
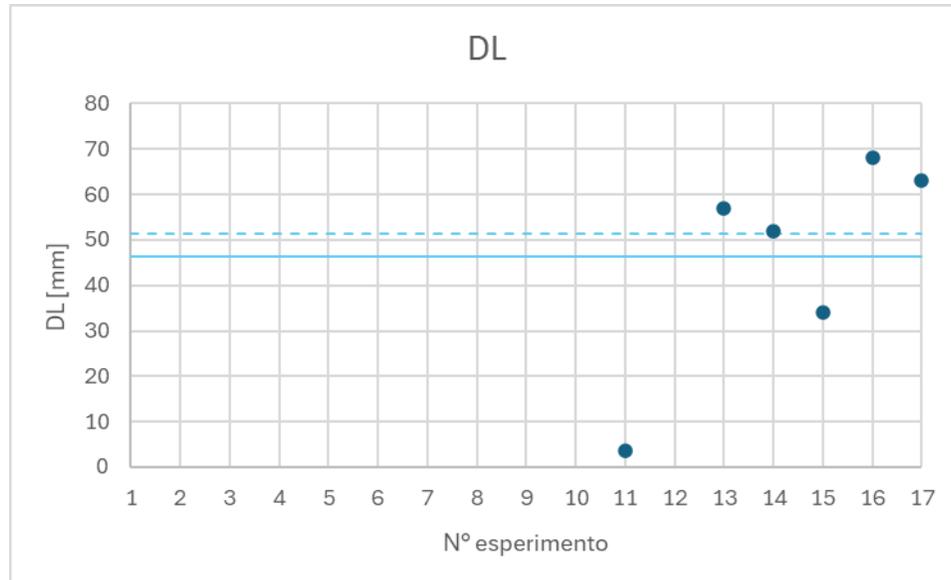
Nella *seguente diapositiva* si riportano i risultati ottenuti prendendo come *riferimento i valori medi veri e propri*; nella *slide successiva* verranno invece riportati gli stessi risultati determinati *rispetto alla media senza outlier*.

1.2 – Analisi statistica e diagrammi

Errore assoluto (in modulo) con reference con la media w/o outlier								
	mm	s	mm/s	mm	s-1	/	m2/s	
	DL	DT	c_fase	lambda	omega	Re	nu	
1		17%	29%	17%	40%	15%	26%	24%
2		12%	29%	11%	20%	36%	26%	22%
3		11%	43%	26%	19%	73%	25%	33%
4		11%	38%	24%	16%	72%	25%	31%
5		11%	34%	15%	19%	64%	25%	28%
7		3%	16%	22%	32%	37%	25%	23%
8		5%	16%	17%	27%	41%	25%	22%
9		19%	21%	11%	11%	56%	25%	24%
10		27%	1%	6%	3%	40%	28%	18%
11	93%	56%	53%	1%	61%	205%	45%	73%
12		9%	63%	42%	36%	50%	66%	44%
13	11%	24%	48%	27%	20%	93%	26%	35%
14	1%	10%	38%	17%	21%	64%	26%	25%
15	34%	10%	13%	25%	58%	13%	26%	25%
16	32%	24%	74%	17%	55%	106%	26%	48%
17	22%	24%	79%	46%	27%	161%	26%	55%
	32%	17%	37%	20%	29%	70%	29%	

Si riporta a sinistra quanto i valori associati ad una singola misurazione si discostino dal valore medio (**senza outlier**) previsto dalla distribuzione normale.

1.2 – Analisi statistica e diagrammi

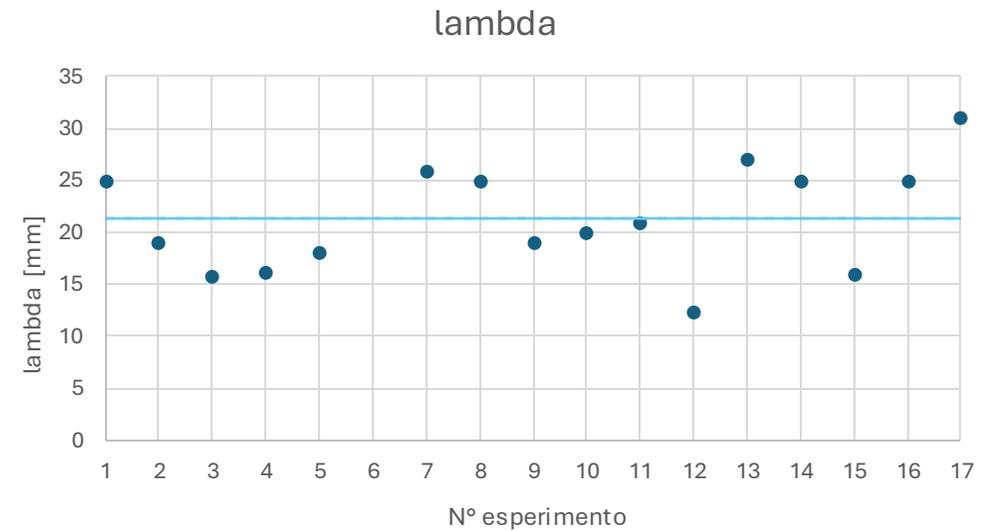
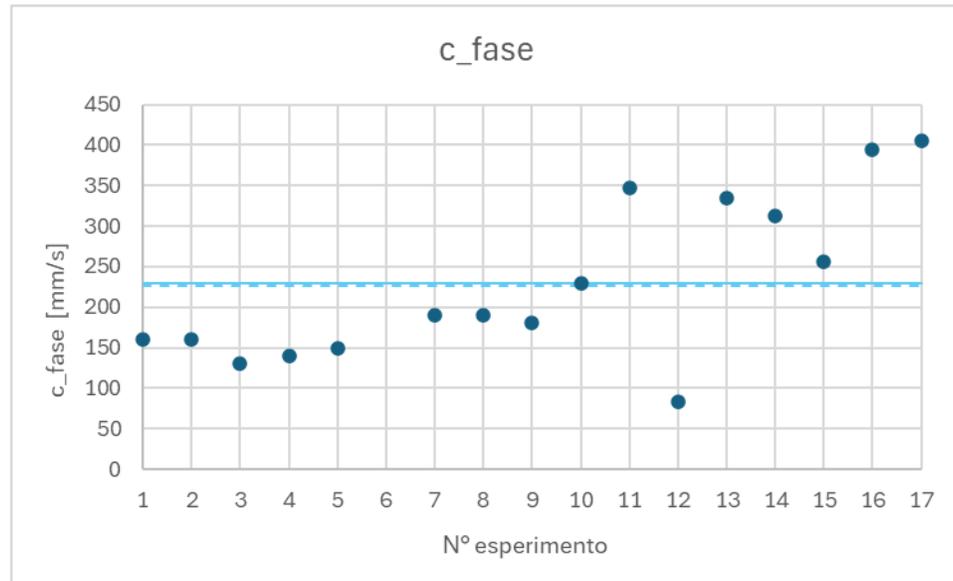


DL = Spostamento di un punto selezionato all'interno del campo del flusso visualizzato

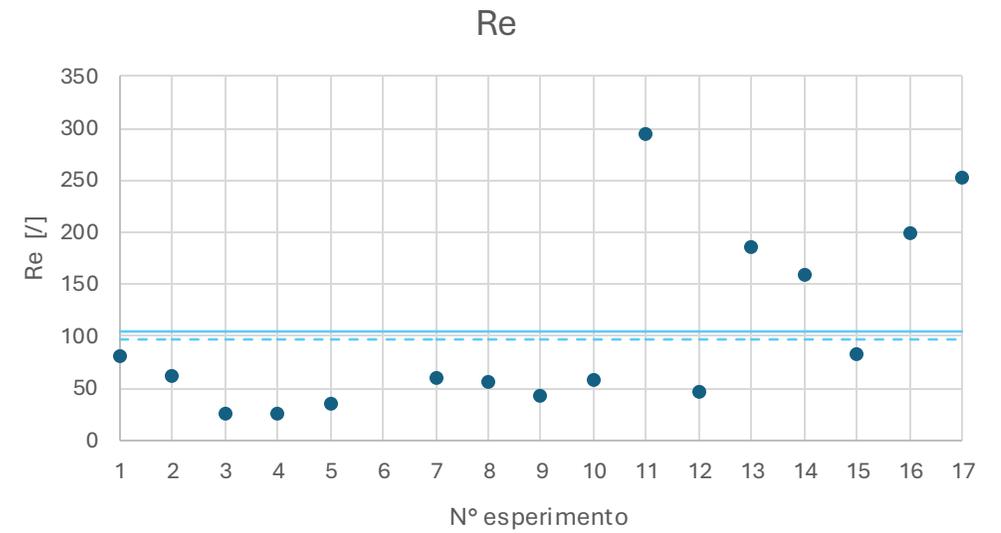
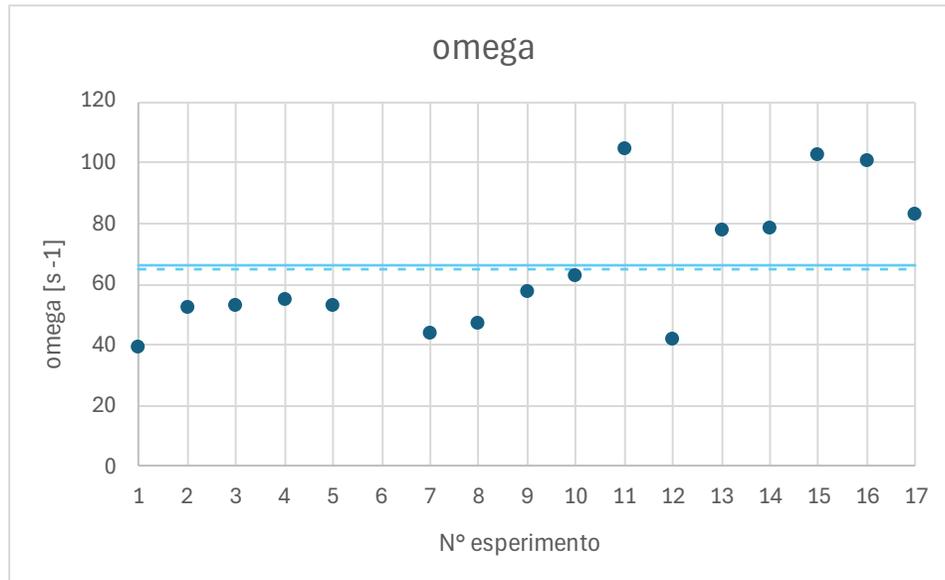
DT = variazione temporale, corrispondente al DL, calcolata sulla base del numero di frame al secondo, tra il frame iniziale e il frame finale

N° = indice dell'esperimento all'interno dell'ensemble osservato

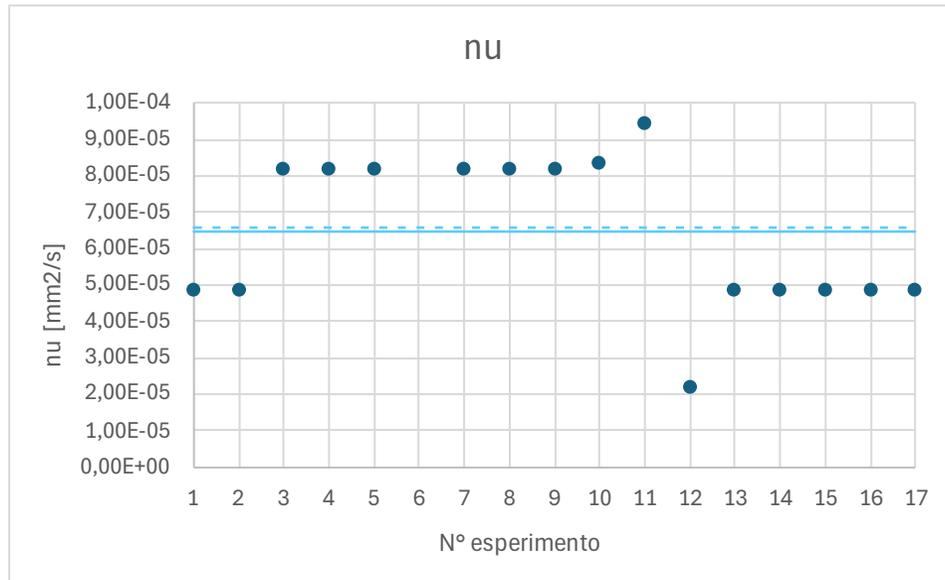
1.2 – Analisi statistica e diagrammi



1.2 – Analisi statistica e diagrammi



1.2 – Analisi statistica e diagrammi



1.3 - Collezione dei filmati

Link filmati raccolti da studenti del corso:

[s330010](#) - Zulli Eleonora

[s304985](#) - Spanu Niccolo'

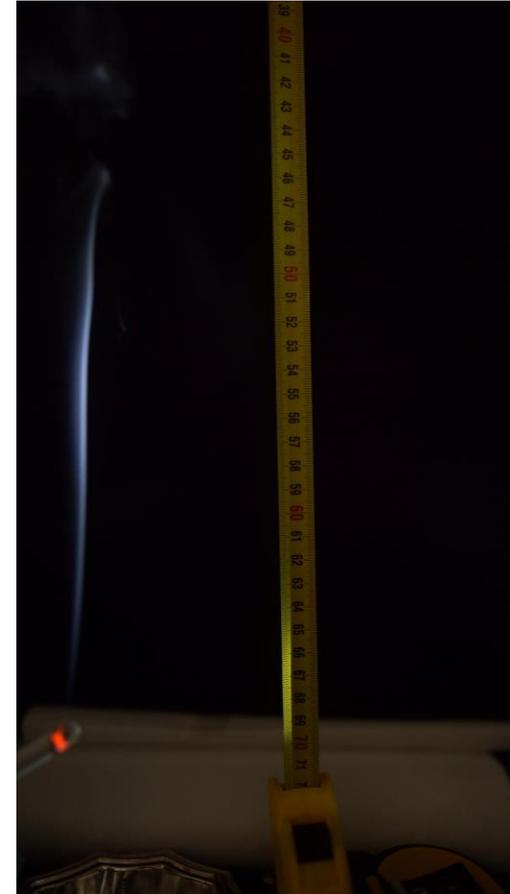
[s322785](#) - Pascale Christian

[s324427](#) - Monopoli Germano

[S331976](#) - Frumusa Alice

[s335002](#) - Zani Marcello

[Instabilita.mp4](#) - Papalia Gabriele



SONY A7III – 25 FPS
Monopoli Germano

2 - Getto turbolento



In questo secondo esperimento ci si è focalizzati sul calcolo del numero di Reynolds di un getto turbolento.

Il getto è stato generato grazie all'inspirazione e poi successiva espirazione del fumo di una sigaretta da parte di un volontario.

2.1 - Risultati

DX	V	Re	nu
14	183.5	17127	0.000015

DX: **distanza dalla bocca in cui si genera la prima struttura turbolenta**. Viene misurata in [cm].

V: **velocità stimata del getto**. Viene misurata in [cm/s]

Re: **numero di Reynolds** stimato per il getto. Adimensionale

Nu: **viscosità cinematica** dell'aria relativa ad una temperatura **T=20°**. Viene misurata in [m²/s]

2.2 - Collezione dei filmati

[20241129_133757.mp4](#)

[20241129_133648.mp4](#)

[20241129_133648.mp4](#)

[20241129_133850.mp4](#)

[20241129_133912.mp4](#)

[20241129_134328.mp4](#)

[20241129_134350.mp4](#)

[20241129_131301.mp4](#)

[20241129_131248.mp4](#)

[20241129_130812.mp4](#)

Video di Spanu Nicolo'

[20241129_130812.mp4](#)

Video di Zani Marcello

3 – Conclusioni

Dal confronto tra i due esperimenti svolti durante l'attività di laboratorio possiamo osservare in che modo un contributo energetico influisca su un flusso.

Nel primo esperimento il flusso è inizialmente laminare fino a quando non si vanno a presentare le prime instabilità (fronti d'onda). Successivamente, quando il fumo si allontana dalla sigaretta, il flusso tenderà a dissipare.

Il Reynolds stimato è dell'ordine di 10^2 .

Nel secondo esperimento invece siamo in regime turbolento. Il Reynolds stimato è dell'ordine di 10^4 .

L'aumento del Reynolds rispetto al primo caso è attribuibile alla differente velocità del flusso dovuta ad una azione esterna, che in questo caso risulta essere molto maggiore rispetto al primo.

Essendo stata immessa nel sistema dell'energia cinetica dall'esterno (durante l'espiazione), questo flusso è molto più energetico rispetto al primo e per questo motivo è interessante osservare la cascata energetica che si manifesta nel corso del secondo esperimento.

Si può infatti notare che durante il processo di dissipazione l'energia viene distribuita in un nutrito spettro di scale. Sono infatti presenti, in questo caso, delle strutture di dimensioni molto più piccole rispetto al primo.

Appendice: costruzione di una macchina del fumo in dimensioni ridotte



Al di fuori dell'esperienza di laboratorio svolta in classe è stato sviluppato un sistema per osservare come si modificano le strutture turbolente all'aumentare del numero di Reynolds.

Il sistema è costituito da una penna con punta svitabile, una breadboard, una batteria, cavi per i collegamenti, un piccolo motore DC, una piccola ventola e un serbatoio.



Ventola interna (a lato) e serbatoio sono stati ricavati a partire da materiali plastici di recupero

Finalità

Il sistema permette di visualizzare come si modificano le strutture dei flussi nel caso in cui si vada ad incentivare la transizione verso la turbolenza.

La turbolenza viene incentivata andando ad aumentare il numero di Reynolds del flusso. Questo effetto viene ottenuto riducendo la dimensione del diametro dell'ugello (penna).

In questo caso ci si limita ad una analisi qualitativa dato che il sistema è soggetto ad eventuali fluttuazioni interne che potrebbero andare a falsare il calcolo del numero di Reynolds.

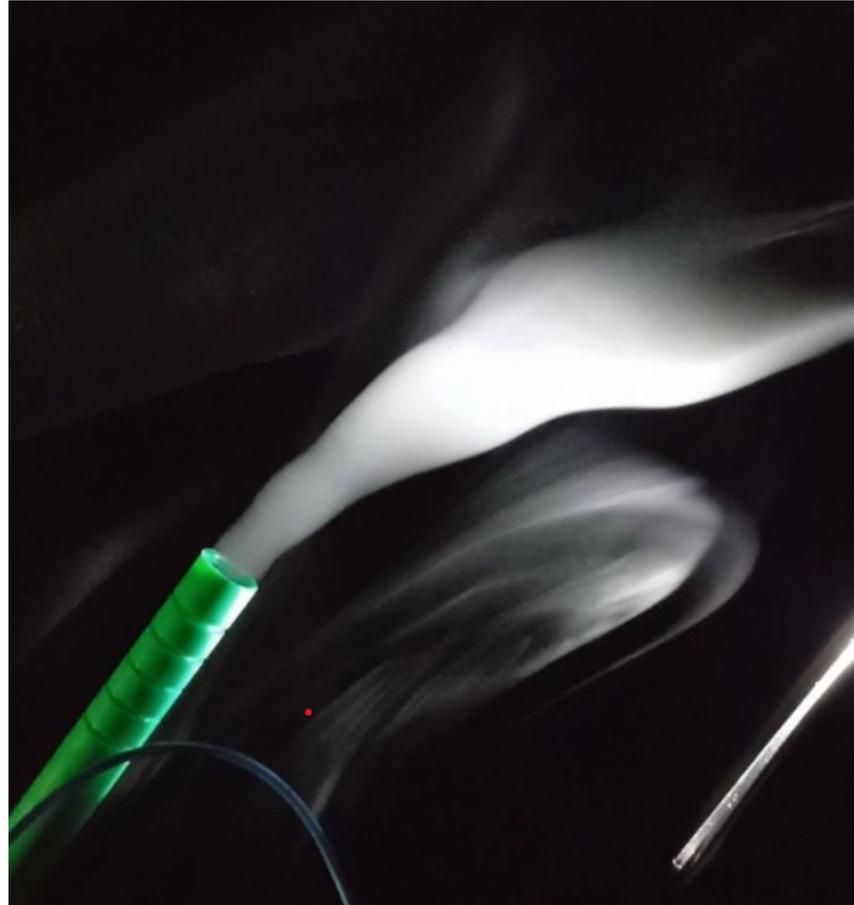
Si sottolinea inoltre che il sistema è fortemente sensibile alle condizioni al contorno: questo infatti aspira il fumo prodotto dalla combustione di un cono di cartoncino riempito di filamenti di carta da cucina per poi espellerlo dall'ugello.

Descrizione del setup sperimentale

Per quanto riguarda il setup sperimentale, si è fatto in modo che eventuali fumi della combustione e quelli dell'ugello fossero quanto più possibile separati tramite l'ausilio di un telo nero. Le registrazioni sono state svolte all'interno di una camera buia in cui il flusso è stato illuminato tramite una lama di luce ricavata a partire da una torcia.



Caso 1: Ugello grande. flusso a Reynolds basso



Link video:

[eleonora_zulli_ugello_grande_s330010.mp4](#)

Caso 2: Ugello grande. Aumento portata

In questo caso le strutture si sono modificate rispetto al primo caso, pur usando lo stesso ugello.

Si può ipotizzare che il Reynolds sia aumentato rispetto al caso 1 poiché purtroppo la combustione si era estesa anche a parte del sistema stesso.



Link video:

[eleonora_zulli_ug_grande2_s330010.mp4](#)

Caso 3: Ugello piccolo. Flusso a Reynolds alto



Link video:

[eleonora_zulli_ugello_piccolo1_s330010.mp4](#)

Caso 4: Ugello piccolo. Riduzione portata

Situazione simile al caso 2 ma opposta: in questo caso si può ipotizzare che il Reynolds si sia ridotto a causa di una riduzione della portata. Il motivo di tale riduzione è che la combustione del cono stava venendo meno.



Link video:

[eleonora_zulli_ug_piccolo_spegnendosi_s330010.mp4](#)