



ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

---

Dipartimento di Ingegneria industriale

Corso di Laurea in  
INGEGNERIA AEROSPAZIALE

**STUDIO E REALIZZAZIONE DI  
UNA GALLERIA  
AERODINAMICA A FILM DI  
SAPONE**

Elaborato finale di laurea in  
Aerodinamica degli Aeromobili

**Tutor Accademico**

Prof. Alessandro Talamelli

**Studente**

Filippo Scorza

---

Anno Accademico 2024/2025



# Indice

<b>Elenco delle figure</b>	<b>6</b>
<b>Elenco delle tabelle</b>	<b>8</b>
<b>Acronimi</b>	<b>10</b>
<b>1 Film di sapone</b>	<b>15</b>
1.1 Fenomeni di superficie . . . . .	15
1.2 Colloidi . . . . .	17
1.3 Saponi e detersivi . . . . .	18
1.4 Formazione film di sapone . . . . .	19
<b>2 Galleria aerodinamica a film di sapone</b>	<b>20</b>
2.1 Cenni Storici . . . . .	20
2.2 I vari design . . . . .	20
<b>3 Configurazione scelta</b>	<b>23</b>
3.1 Il telaio . . . . .	23
3.2 Inclinazione variabile . . . . .	24
3.3 I Tensionatori . . . . .	25
3.4 Ugello . . . . .	26
3.5 Ricevitore fili guida . . . . .	27
3.6 Cablaggio e nodi utilizzati . . . . .	28
<b>4 Sperimentazioni con le soluzioni di sapone</b>	<b>33</b>
4.1 Metodologia sperimentale preliminare . . . . .	33
4.2 Risultati chiave . . . . .	35
4.3 Test in galleria . . . . .	36
4.4 Considerazioni finali . . . . .	37
<b>5 Test a struttura inclinata</b>	<b>38</b>
<b>6 Visualizzazioni</b>	<b>40</b>
6.1 Configurazione usata . . . . .	40
6.2 Istantanee con fotocamera normale . . . . .	41
6.3 Istantanee con fotocamera ad alta velocità . . . . .	42
<b>7 Debolezze del setup e possibilità di miglioramento</b>	<b>43</b>
7.1 Riprogettazione di nozzle e ricevitore . . . . .	44

7.2	Progettazione di bracci telescopici . . . . .	44
7.3	Progettazione di un adattatore per bottiglie in pet da 1.5L . . . . .	44
7.4	Sistema di ricircolo della soluzione . . . . .	45
7.5	Sistema di riferimento locale . . . . .	45
7.6	Meccanismi a cric per i tensionatori . . . . .	45
7.7	Sistema di controllo della temperatura . . . . .	45
7.8	Sistema di perturbazione controllata mediante speaker . . . . .	45
<b>A</b>	<b>Manuale d'uso della struttura</b>	<b>47</b>
A.1	Definizione del volume di controllo . . . . .	47
A.2	Riempimento della tanica con soluzione saponata . . . . .	48
A.3	Pulizia dei fili guida del flusso . . . . .	48
A.4	Apertura del rubinetto e formazione della lamina . . . . .	49
A.5	Inclinazione della struttura (se necessario) . . . . .	49
A.6	Extra . . . . .	50
<b>B</b>	<b>Digital particle tracking velocimeter</b>	<b>51</b>
B.1	Il nostro PIV . . . . .	52
B.2	Funzioni principali e gestione dei frame . . . . .	54
B.3	Istruzioni per l'uso del software . . . . .	60
	<b>Bibliografia</b>	<b>65</b>



# Elenco delle figure

1.1	L'acqua risale il capillare, il mercurio lo scende. . . . .	16
1.2	L'angolo theta dell'acqua indica che bagna il vetro, al contrario del mercurio. . . . .	16
1.3	Raffigurazione dei tre tipi di sistemi dispersi, nota l'effetto Tyndall.	17
1.4	Schema molecola di sapone e Micella con sporco al centro. . . . .	18
1.5	Schema del film di sapone, acqua saponata circondata da molecole di sapone. . . . .	19
2.1	Schema concettuale dell'apparato di Couder[6]. . . . .	20
2.2	Schema concettuale dell'apparato di Gharib e i suoi collaboratori[4].	21
2.3	Schema concettuale dell'apparato di Kellay[4]. . . . .	21
2.4	Schema elementare del design di Ma.Rutgers[4]. . . . .	22
2.5	Schema concettuale dell'apparato di T.Muijres Æ David Lentink[5].	22
3.1	A sinistra, render del prototipo del telaio, a destra telaio in fase di costruzione. . . . .	23
3.2	A sinistra, render della struttura con meccanismo di inclinazione, a destra prototipo in fase di realizzazione. . . . .	24
3.3	Leva di serraggio con bullone passante. . . . .	24
3.4	Prototipo di tensionatore sul cad. . . . .	25
3.5	Tensionatore stampato in pla e assemblato. . . . .	25
3.6	Esploso di un tensionatore prima di essere assemblato. . . . .	25
3.7	Prototipo di ugello con raccordo ad ardiglione. . . . .	26
3.8	Prototipo di adattatore per la tanica con raccordo ad ardiglione. . .	26
3.9	Assieme completo, con tubo in silicone da 9mm di diametro esterno e 6mm di diametro interno. . . . .	26
3.10	Rendering di un prototipo, vista in sezione. . . . .	27
3.11	Due prototipi, impermeabilizzati con colla riempitiva e nastro al teflon.	27
3.12	Sistema finale con doppio tensionatore. . . . .	27
3.13	A sinistra tensionatore con anello connesso da avvolgere, a destra ricevitore con esempio di cablaggio. . . . .	28
3.14	Sequenza di realizzazione del doppio nodo del pescatore. . . . .	29
3.15	Configurazione finale del doppio nodo del pescatore serrato. . . . .	30
3.16	Istruzioni sul nodo a bocca di lupo, a destra esempio di nodo realizzato. . . . .	30
3.17	A sinistra, realizzazione dell'asola, a destra, inserimento filo guida nell'asola. . . . .	31

4.1	A sinistra, i provini delle soluzioni, a destra test di una soluzione, nota il film che drena in basso. . . . .	34
5.1	Telaio secondario estratto, con formazione di film inclinato . . . . .	38
5.2	Primo piano del film inclinato in regime di moto turbolento. . . . .	39
6.1	Immagine del telaio configurato per le riprese. . . . .	40
6.2	Immagini del film a distanza ravvicinata. . . . .	41
6.3	Interferenza nel film causata da un corpo estraneo. . . . .	41
6.4	A sinistra interferenze causate dai nodi, illuminato con lampada a led, a destra film in condizioni stazionarie illuminato con la lampada al sodio, in assenza di portata. . . . .	42
6.5	Film prossimo alla rottura, illuminato con la lampada a led. . . . .	42
7.1	A sinistra, il nozzle con una cospicua perdita di soluzione, a destra formazione di schiuma nel ricevitore. . . . .	44
A.1	Allentare i bulloni e, per agevolare lo scorrimento, applicare pressione su entrambi i bulloni. . . . .	47
A.2	Evitare di tensionare troppo il tubo in silicone onde evitare la rottura del nozzle. . . . .	48
A.3	Immagine della struttura inclinata. . . . .	49
B.1	Esempio del programma realizzato. . . . .	52
B.2	Interfaccia del programma. . . . .	53
B.3	Il programma è capace di gestire anche riprese sub ottimali. . . . .	60
B.4	Esempio di cella troppo piccola a sinistra e troppo grande a destra. . . . .	61
B.5	A sinistra senza filtro, a destra con filtro. . . . .	62
B.6	Simulazione con la finestra = 0, nota l'instabilità della velocità . . . . .	62
B.7	Simulazione con finestra = 5, i dati risultano più stabili e coerenti. . . . .	63
B.8	A riprova della bontà dei risultati, con una finestra molto grande il risultato non discosta da quello precedente. . . . .	63
B.9	Esempio di tracciamento con bounding box e traiettoria, nota come sono stati intercettati centroidi dovuti a rumore del video. . . . .	64



# Elenco delle tabelle

4.1	Risultati delle prove preliminari nei bicchieri. . . . .	34
4.2	Risultati preliminari usando la galleria a film di sapone. . . . .	36



# Acronimi

<b>CAD</b>	Computer Aided Design
<b>CICLoPE</b>	Center for International Cooperation in Long Pipe Experiments
<b>FDM</b>	Fused Deposition Modeling
<b>UNIBO</b>	University of Bologna



# Sommario

La presente tesi documenta la progettazione e la realizzazione di una galleria aerodinamica a film di sapone, uno strumento impiegato per l'osservazione di fenomeni fluidodinamici bidimensionali, come i flussi turbolenti.

## Teoria e formazione del film (Capitolo 1)

Il documento introduce i principi fisici fondamentali, concentrandosi sulla tensione superficiale. Le molecole di sapone, grazie alla loro duplice natura (testa idrofila e coda idrofoba), riducono la tensione superficiale dell'acqua pura, permettendo la creazione di un film stabile racchiuso tra due strati di tensioattivi.

## Scelte progettuali (Capitoli 2 e 3)

Analizzati i design storici, la scelta è ricaduta su una configurazione innovativa dotata di inclinazione variabile, resa possibile da un telaio secondario regolabile. La struttura si avvale di profilati in alluminio, tensionatori per la regolazione dell'area, un ugello e ricevitore con un cablaggio ottimizzato tramite l'uso del doppio nodo del pescatore e del nodo a bocca di lupo.

## Sperimentazione sulle miscele (Capitolo 4)

I test condotti hanno evidenziato tre fattori critici per la stabilità del film:

- L'aggiunta di glicerina alla soluzione.
- Il riposo della miscela per almeno 24 ore prima dell'utilizzo.
- L'impiego di saponi commerciali di marca, nettamente superiori rispetto ai prodotti generici nella creazione di un film.

## Test con il telaio inclinato (Capitolo 5)

Fissata una buona soluzione, è stata testata la capacità della struttura di generare un film a vari angoli di inclinazione.

## Visualizzazioni (Capitolo 6)

A scopo dimostrativo, è stata configurata la struttura per eseguire varie visualizzazioni dei moti fluidodinamici nel film di sapone.

## Miglioramenti futuri e conclusioni (Capitolo 7)

In questo capitolo vengono evidenziati vari difetti di questa struttura e possibili miglioramenti per risolverli, aumentando le capacità di questo strumento.

# Summary

This thesis documents the prototyping and making of an aerodynamic soap film tunnel, an instrument used to observe bidimensional fluidodynamic phenomena, like turbulent flows.

## Theory and making of a soap film (Chapter 1)

This sections starts with the fundamental principles of soap film, focusing on surface tension. The soap molecules, thanks to their double nature (hydrophilic head and hydrophobic tail), are able to lower the surface tension of pure water, allowing the creation of a stable film, enclosed between two tensioactive layers.

## Engineering choices (Chapter 2 and 3)

After analysing various older designs, it has been decided to create novel design, with the possibility of both vertical and inclined tests, made possible by using a subframe. The structure uses aluminum profiles, cable rollers to adjust the control volume, nozzle and receiver to transfer the soap solution ot the cables and retrieve it. Also the knots used, the cowhitch and the double fisherman knot, are described in these chapters.

## Testing of various soap solutions (Chapter 4)

The test made in this section gave us three key factors:

- The use of gliceryn can help the solution form a sturdier film
- The solution need to rest for atleast 24 hours
- The use of branded soap instead of a discount one, makes a huge difference in the film formation

## Testing of the frame while inclined (Chapter 5)

After choosing a soap solution that works for us, we tested the capability of the structure to generate inclined films, at various degree of inclination.

## Visualizations (Chapter 6)

For demonstration purposes, we configured the structure to make a few visualizations of fluidodynamics phenomena in the soap film using a high speed camera.

## Possible improvements (Chapter 7)

Here are enlightened some flaws of this design, and enlisted various improvements to overcome them and futher improve the capabilities of this instrument.

# Introduzione

Le gallerie aerodinamiche a film di sapone rappresentano un'interessante alternativa alle gallerie del vento tradizionali per lo studio di fenomeni fluidodinamici bidimensionali. Grazie alla capacità di generare un flusso quasi bidimensionale all'interno di un film sottile, questo dispositivo consente l'osservazione diretta di vortici, instabilità e strutture turbolente altrimenti solo affrontabili con un approccio numerico. Tale approccio sperimentale è stato esplorato in letteratura, a partire dagli studi pionieristici di Couder e da successive ricerche sulla turbolenza bidimensionale.

La presente tesi si inserisce come naturale prosecuzione del tirocinio curricolare svolto presso il laboratorio CICLoPE, durante il quale è stato sviluppato il progetto preliminare di una galleria aerodinamica a film di sapone. In questa fase, il lavoro si concentra sul passaggio dalla progettazione alla realizzazione effettiva del dispositivo, affrontando gli aspetti costruttivi, le scelte tecniche e le soluzioni pratiche necessarie per dare forma a un prototipo funzionante.

L'obiettivo è quello di realizzare un dispositivo sperimentale versatile e migliorabile, che possa essere impiegato dal laboratorio sia per attività di ricerca sia per scopi didattici, contribuendo allo studio dei flussi bidimensionali.

# Capitolo 1

## Film di sapone

Introduciamo il film di sapone[1], il protagonista principe del tirocinio.

### 1.1 Fenomeni di superficie

I fenomeni di superficie giocano un ruolo cruciale nella creazione e mantenimento del film, in seguito ne descriviamo tre, utili al nostro progetto.

#### Tensione Superficiale

La tensione superficiale  $\sigma$  è una proprietà dei fluidi che descrive la forza per unità di lunghezza presente lungo la superficie di separazione tra due fasi, un chiaro esempio è la superficie del film di sapone. Essa è causata dalle forze coesive tra le molecole del fluido e viene espressa in unità di N/m. La tensione superficiale può essere calcolata come:

$$\sigma = \frac{F}{L}$$

dove:

$\sigma$  : tensione superficiale [N/m]

$F$  : forza agente lungo il bordo della superficie [N]

$L$  : lunghezza del contorno su cui agisce la forza [m]

## Bagnabilità

La bagnabilità di una superficie solida da parte di un liquido è determinata dall'angolo di contatto  $\theta$  (si veda figura 2.3), che è l'angolo formato dalla tangente alla superficie del liquido con la superficie solida. In base all'angolo di contatto definiamo una superficie poco bagnabile (idrofoba) o molto bagnabile (idrofila)

## Capillarità

Il fenomeno della capillarità si verifica quando un liquido risale o scende in un tubo capillare a causa della combinazione tra la tensione superficiale e le forze di adesione con la parete solida. L'altezza  $h$  raggiunta dal liquido in un capillare di raggio  $r$  è descritta imponendo l'equilibrio tra le forze di superficie e gravità:

$$h = \frac{2 \sigma \cos \theta}{\rho g r}$$

dove:

- $h$  : altezza di risalita del liquido [m]
- $\sigma$  : tensione superficiale del liquido [N/m]
- $\theta$  : angolo di contatto liquido–solido [–]
- $\rho$  : densità del liquido [kg/m<sup>3</sup>]
- $g$  : accelerazione di gravità [m/s<sup>2</sup>]
- $r$  : raggio del capillare [m]

Se  $\theta < 90^\circ$ , il liquido sale nel capillare (ad esempio, l'acqua nel vetro); se  $\theta > 90^\circ$ , il liquido viene respinto verso il basso. (si veda figura 2.2)

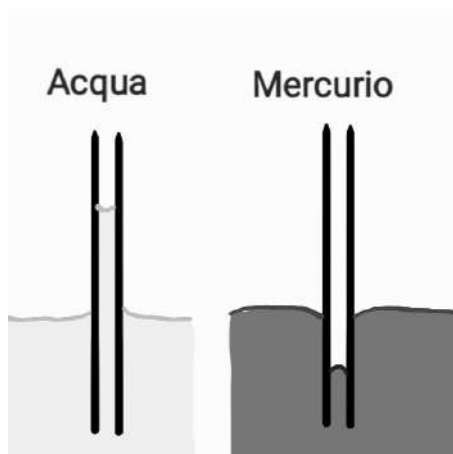


Figura 1.1: L'acqua risale il capillare, il mercurio lo scende.

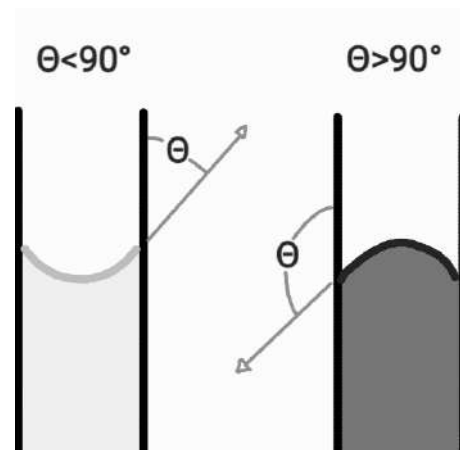


Figura 1.2: L'angolo theta dell'acqua indica che bagna il vetro, al contrario del mercurio.

## 1.2 Colloidi

I colloidi sono sistemi dispersi in cui una fase (fase dispersa) è distribuita all'interno di un'altra fase continua (fase disperdente). Le particelle colloidali hanno dimensioni tipicamente comprese tra 1 nm e 1  $\mu\text{m}$ , il che conferisce loro proprietà distintive rispetto ai miscugli veri e propri.

### Classificazione dei Colloidi

I colloidi possono essere classificati in base alla natura della fase dispersa e della fase disperdente:

- **Soli** (solido in liquido) - es. inchiostri, vernici.
- **Gel** (solido in liquido con struttura reticolare) - es. gelatina.
- **Aerosol liquidi** (liquido in gas) - es. nebbia, spray.
- **Aerosol solidi** (solido in gas) - es. fumo, polveri.
- **Emulsioni** (liquido in liquido) - es. latte, maionese.
- **Schiume** (gas in liquido o solido) - es. panna montata, schiuma da barba.

### Differenze tra Colloidi e Miscugli

I colloidi si differenziano dai miscugli ordinari per la dimensione delle particelle [ $1\text{nm} - 1000\text{nm}$  contro  $< 1\text{nm}$ ] e le loro proprietà ottiche, I colloidi disperdono la luce, rendendo visibile il percorso di un fascio luminoso (effetto acqua torbida), a differenza delle soluzioni omogenee (effetto Tyndall)

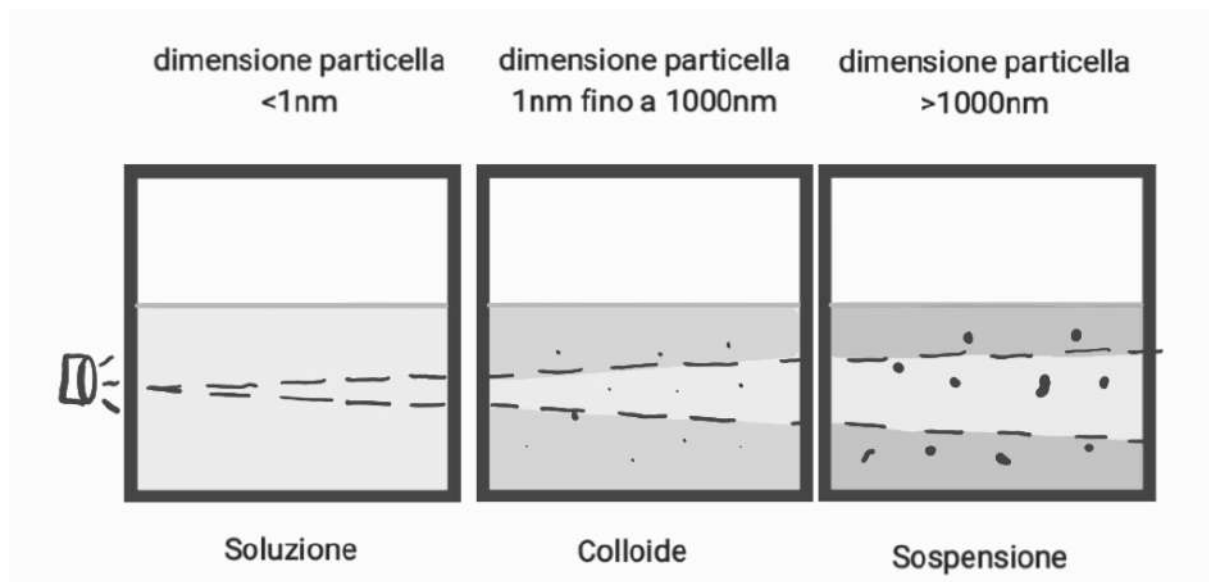


Figura 1.3: Rappresentazione dei tre tipi di sistemi dispersi, nota l'effetto Tyndall.

## 1.3 Saponi e detersivi

Descriviamo ora brevemente la composizione chimica dei saponi e caratteristiche utili al nostro scopo.

Le molecole di sapone sono composte da una struttura con una doppia natura chimica:

- **Testa idrofila:** attratta dalle molecole d'acqua.
- **Coda idrofoba:** che tende a evitare l'acqua e si lega invece a sostanze grasse o oleose.

Questa particolare struttura consente al sapone di **interagire sia con l'acqua che con lo sporco grasso**, favorendo la rimozione delle impurità dalle superfici.

### Formazione di micelle

Quando le molecole di sapone sono disperse in acqua, tendono ad auto-organizzarsi in **micelle**, strutture sferiche in cui:

- Le code idrofobe si orientano verso l'interno, intrappolando le particelle di grasso.
- Le teste idrofile si orientano verso l'esterno, in contatto con l'acqua.

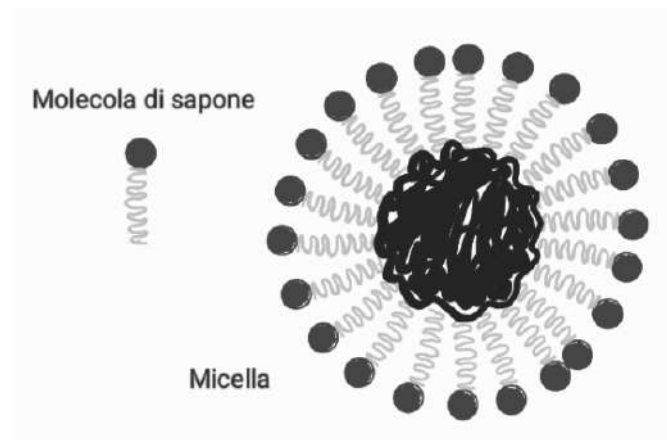


Figura 1.4: Schema molecola di sapone e Micella con sporco al centro.

### Effetto sulla tensione superficiale

Le molecole di sapone si posizionano all'interfaccia aria-acqua, interrompendo la rete di legami a idrogeno tra le molecole d'acqua. Questo effetto comporta una **riduzione della tensione superficiale** dell'acqua, rendendola più efficace nel bagnare le superfici e penetrando nei pori dei materiali.

## 1.4 Formazione film di sapone

Al fine di raggiungere gli obiettivi che ci siamo posti per questo progetto è importante conoscere la natura della formazione del film di sapone.

### Il ruolo della tensione superficiale

La ragione per cui non è possibile creare un film con acqua pura risiede nella sua tensione superficiale, normalmente è troppo forte e per sua natura tenderebbe a far collassare qualsiasi strato d'acqua sufficientemente grande in gocce.

**L'acqua saponata d'altronde contiene i tensioattivi**, molecole disposte sulle interfacce aria-liquido che ne indeboliscono la tensione superficiale permettendo la creazione di un film di sapone, composto da uno strato di acqua saponata racchiuso da due strati elastici di tensioattivi.

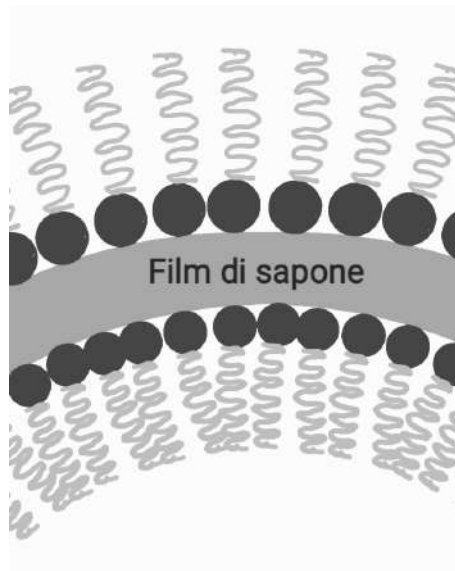


Figura 1.5: Schema del film di sapone, acqua saponata circondata da molecole di sapone.

# Capitolo 2

## Galleria aerodinamica a film di sapone

La galleria aerodinamica a film di sapone è una semplice strumentazione che permette l'osservazione e studio di fenomeni semi-bidimensionali del flusso, altrimenti solo approcciabili numericamente, grazie ad un film di sapone scorrevole.

### 2.1 Cenni Storici

La storia della ricerca scientifica sui film di sapone è descritta in *Chronicles of foam films*[2] e risale alla fine del diciassettesimo secolo, quando Boyle e Hooke furono i pionieri sui studi delle bolle di sapone.

Un'altro pioniere, tre secoli dopo, fu Y. Couder[6] che nei film di sapone scorrevoli, trovò una soluzione per visualizzare la turbolenza bidimensionale.

### 2.2 I vari design

#### Design A – Film stazionario[6]

Couder è stato il primo a considerare i film di sapone come piattaforma sperimentale per la dinamica del flusso turbolento bidimensionale. In questo esperimento, provini venivano trascinati attraverso un film di sapone immobile.

*Limitazioni:* lunghi tempi di preparazione tra un esperimento e l'altro, impossibilità di effettuare misurazioni in regime stazionario.

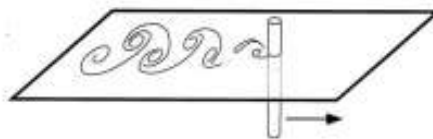


Figura 2.1: Schema concettuale dell'apparato di Couder[6].

### Design B – Film orizzontale in flusso[4]

Gharib e suoi collaboratori hanno realizzato una galleria dove il film scorre orizzontalmente lungo binari rigidi, trascinato da un veloce strato d'acqua pura. La differenza di tensione superficiale tra acqua pura e film saponato genera il moto.

*Limitazioni:* la velocità del film è limitata ( 30 cm/s).

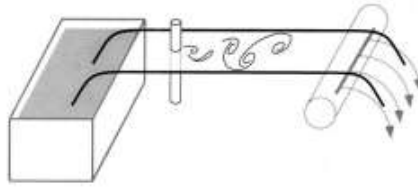


Figura 2.2: Schema concettuale dell'apparato di Gharib e i suoi collaboratori[4].

### Design C – Film in caduta verticale (Kellay)[4]

In questo design, una pellicola di sapone scorre verso il basso tra due fili metallici verticali sotto tensione, alimentata continuamente da un serbatoio superiore mediante fori distribuiti sulla base del film. *Limitazioni:* difficile controllo del flusso e della larghezza del film; la distribuzione del liquido è disomogenea, causando un film non uniforme.



Figura 2.3: Schema concettuale dell'apparato di Kellay[4].

### Design D – Film in caduta verticale (Ma.Rutgers)[4]

In quest'altro design, una pellicola di sapone scorre verso il basso tra due fili di nylon verticali sotto tensione, alimentata continuamente da un serbatoio superiore mediante un unico foro dai cui divergono i fili che sono tirati da quattro tiranti. Raggiunge velocità elevate, di qualche m/s.

*Limitazioni:* Finora è il miglior design realizzato

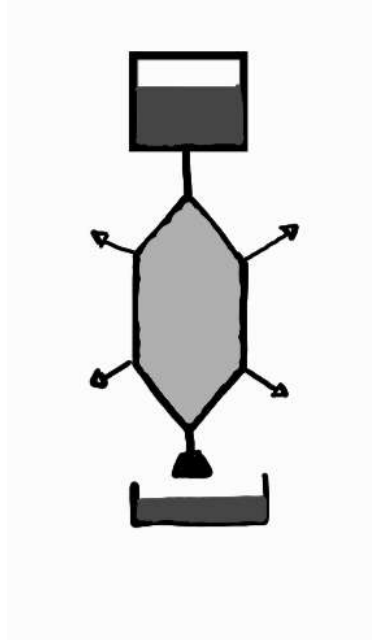


Figura 2.4: Schema elementare del design di Ma.Rutgers[4].

### Design E – Film inclinato[5]

In quest'ultimo design, di Florian T. Muijres Æ David Lentink, una pellicola di sapone scorre inclinata, alimentata continuamente da una pompa di ricircolo. I fili vengono tirati da quattro tiranti.

Capace di ottenere velocità di scorrimento molto basse (0.5m/s).

*Limitazioni:* Non vi sono criticità apparenti rispetto ai design precedenti

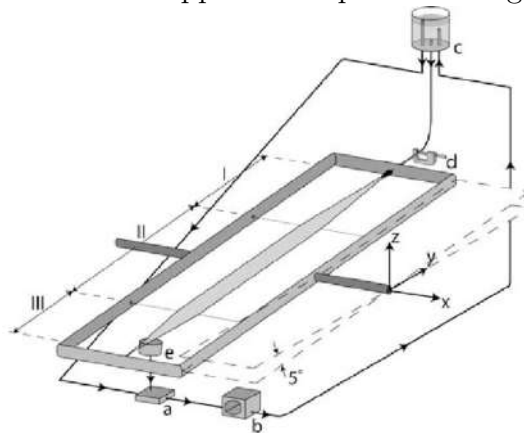


Figura 2.5: Schema concettuale dell'apparato di T.Muijres Æ David Lentink[5].

# Capitolo 3

## Configurazione scelta

La configurazione adottata ha come scopo la realizzazione di una attrezzatura semplice e facilmente migliorabile, ma al contempo con una caratteristica distintiva, la possibilità di poter facilmente variare l'inclinazione della struttura.

### 3.1 Il telaio

Il telaio, di dimensioni 2 m di altezza, 1 m di larghezza e 1 m di profondità, è realizzato con profilati in alluminio 40×40 mm, scelti per garantire leggerezza, rigidità e modularità. Sopporterà al di sopra una tanica d'acqua, che fungerà da fonte del liquido.



Figura 3.1: A sinistra, render del prototipo del telaio, a destra telaio in fase di costruzione.

## 3.2 Inclinazione variabile

Al fine di consentire l'inclinazione variabile, caratteristica distintiva del progetto, è stato previsto un telaio secondario, collegato al telaio principale mediante due bulloni che possono essere allentati, e quindi scorrere su dadi a sfera, per regolare l'inclinazione. Sul telaio secondario sono poi fissati i componenti principali.



Figura 3.2: A sinistra, render della struttura con meccanismo di inclinazione, a destra prototipo in fase di realizzazione.



Figura 3.3: Leva di serraggio con bullone passante.

### 3.3 I Tensionatori

Si tratta di un monoblocco che si aggancia al profilato e che, tramite boccole, sostiene un bullone che funge da perno attorno al quale si avvolge il filo tensionatore. Consente di modificare agevolmente l'area del volume di controllo, sia in altezza che larghezza. È prevista, come possibile miglioria, l'implementazione di un meccanismo a cricchetto per facilitare il tensionamento e il rilascio del filo.

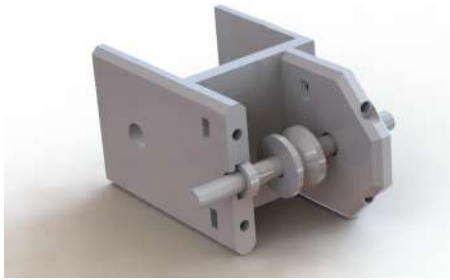


Figura 3.4: Prototipo di tensionatore sul cad.



Figura 3.5: Tensionatore stampato in pla e assemblato.

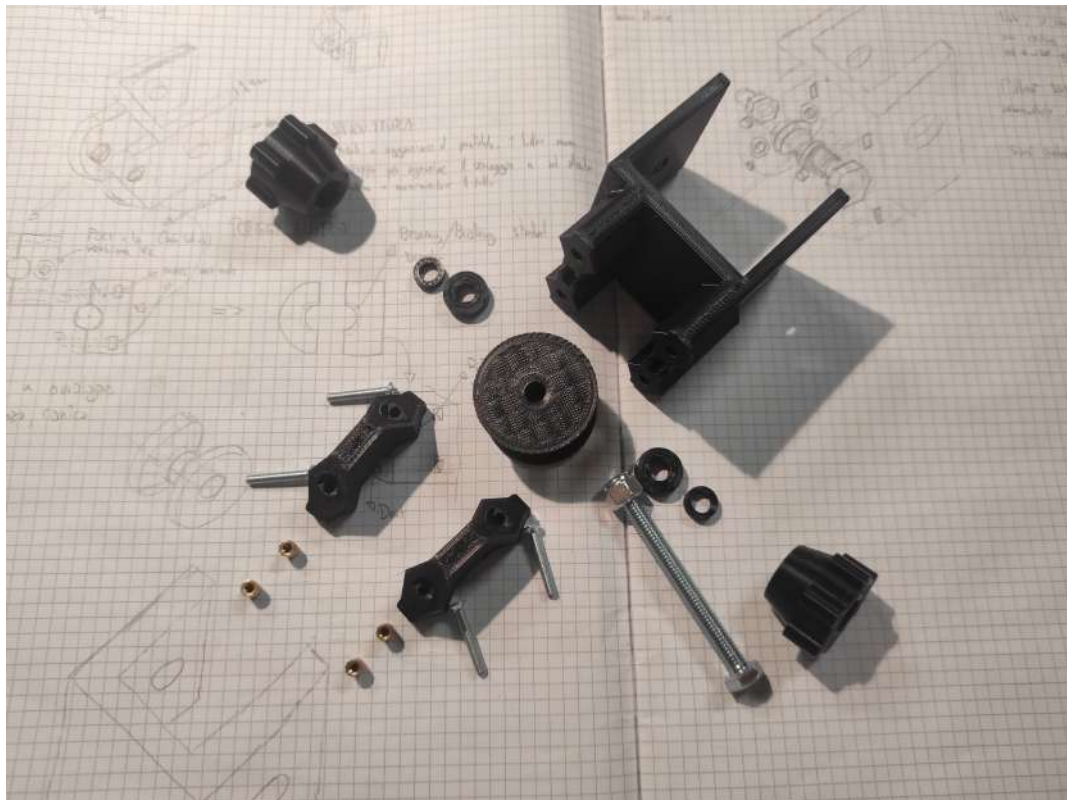


Figura 3.6: Esploso di un tensionatore prima di essere assemblato.

### 3.4 Ugello

L'ugello è una componente fondamentale che trasferisce il flusso d'acqua saponata dal tubo ai fili principali, è sorretto da un costrutto connesso al telaio. E' stato deciso di realizzarlo con la stampante a resina (in alternativa petg) per evitare il problema che a contatto con l'acqua degrada, causando non solo il deterioramento del pezzo ma soprattutto della soluzione saponata.



Figura 3.7: Prototipo di ugello con raccordo ad ardiglione.



Figura 3.8: Prototipo di adattatore per la tanica con raccordo ad ardiglione.



Figura 3.9: Assieme completo, con tubo in silicone da 9mm di diametro esterno e 6mm di diametro interno.

### 3.5 Ricevitore fili guida

Per consentire una buona precisione sul posizionamento del convergente finale e soprattutto al fine di separare l'acqua dai fili guida, per ridurre gli schizzi di acqua e recuperare la soluzione è stato realizzato questo componente, in petg.

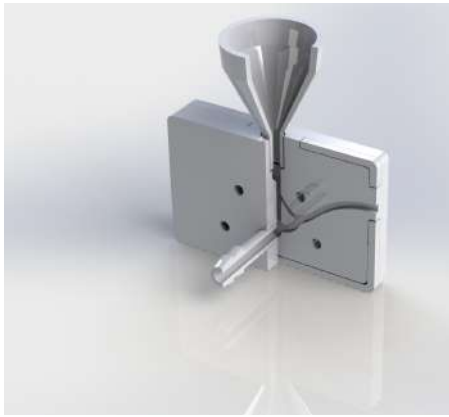


Figura 3.10: Rendering di un prototipo, vista in sezione.



Figura 3.11: Due prototipi, impermeabilizzati con colla riempitiva e nastro al teflon.



Figura 3.12: Sistema finale con doppio tensionatore.

### 3.6 Cablaggio e nodi utilizzati

Al fine di ottenere un sistema efficace ed affidabile nel tempo, è necessario dare la giusta importanza ad un corretto cablaggio e adoperare i giusti nodi.

Partendo dai fili guida(3 metri consigliati), si inizia facendoli passare attraverso il nozzle con un doppio nodo all'estremità superiore per impedirne lo sfilamento.

Per i fili tiranti(3 metri consigliati), si parte realizzando un anello chiuso, di seguito lo si avvolge nel tensionatore, una volta avvolto si realizza una bocca di lupo con l'estremità, a cui va fatto passare il filo guida.

Così per tutti e quattro i tensionatori.

Connessi i fili guida ai tiranti, si procede facendoli passare prima per l'imbuto e poi dentro il ricevitore, infine si avvolgono nei tensionatori inferiori.



Figura 3.13: A sinistra tensionatore con anello connesso da avvolgere, a destra ricevitore con esempio di cablaggio.

## Realizzazione di anello chiuso mediante doppio nodo del pescatore[7]

Il collegamento permanente delle estremità di un filo per la realizzazione di un anello chiuso è stato effettuato mediante il doppio nodo del pescatore (double fisherman's knot). Tale nodo è comunemente impiegato per unire in modo sicuro due estremità di corda o filo, in particolare quando è richiesta elevata resistenza a trazione e ridotta probabilità di scorrimento sotto carico.

Il procedimento adottato è il seguente:

1. Si sovrappongono le due estremità del filo per una lunghezza di alcuni centimetri.
2. Con una delle due estremità si realizzano due avvolgimenti attorno al capo opposto.
3. L'estremità viene quindi fatta rientrare all'interno degli avvolgimenti creati.
4. L'operazione viene ripetuta simmetricamente con l'altra estremità.
5. Tirando i due capi principali, i due nodi scorrono fino a serrarsi reciprocamente, formando un collegamento compatto e autobloccante.

Il nodo risultante presenta elevata compattezza geometrica e buona affidabilità anche su fili di piccolo diametro, risultando idoneo alla realizzazione di un anello chiuso permanente.

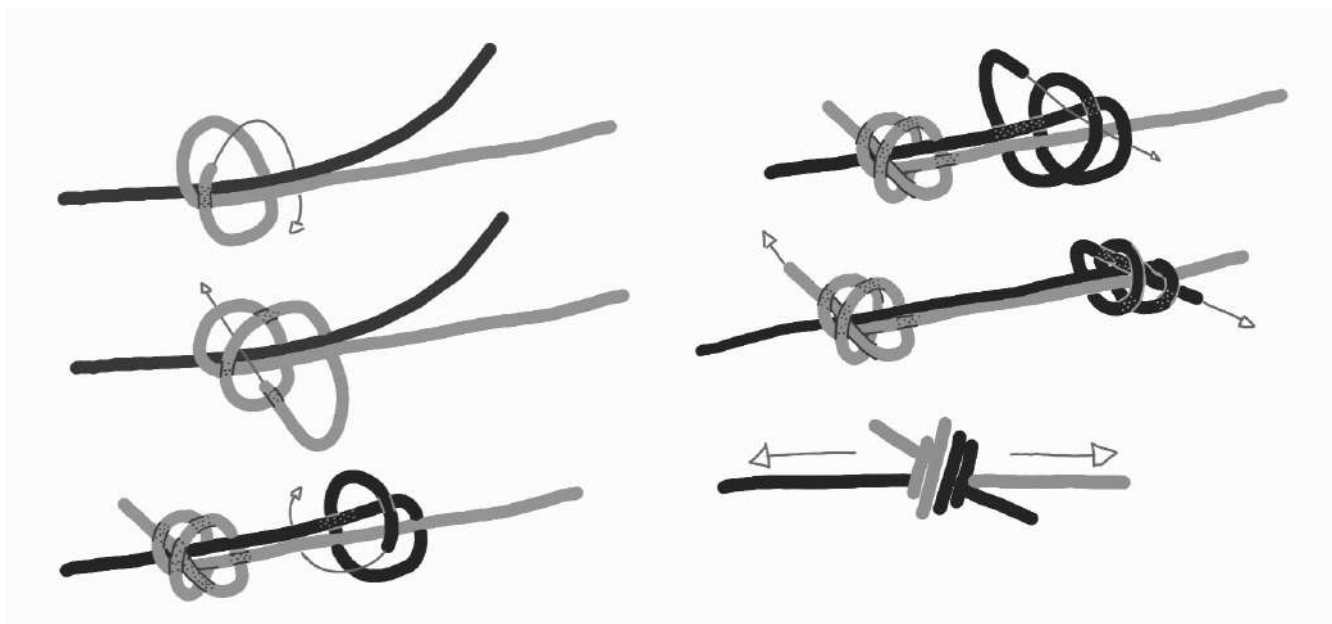


Figura 3.14: Sequenza di realizzazione del doppio nodo del pescatore.

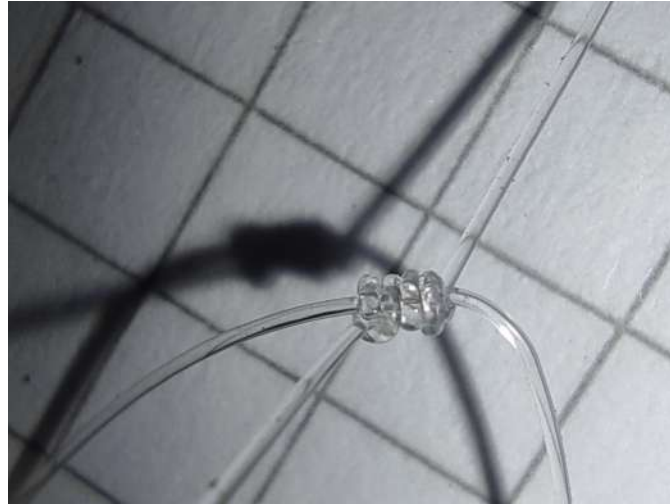


Figura 3.15: Configurazione finale del doppio nodo del pescatore serrato.

### Realizzazione del nodo a bocca di lupo[7]

Per il collegamento tra anello chiuso e filo guida è stato impiegato il nodo a bocca di lupo (cow hitch). Questo nodo costituisce un sistema di collegamento per avvolgimento che mantiene la presa fintanto che il sistema rimane in tensione, le sue dimensioni contenute non interferiscono particolarmente con il film, infine permette di regolare agevolmente il volume di controllo.

La realizzazione avviene secondo la seguente procedura:

1. Si individua una porzione dell'anello chiuso e si crea una piega, formando un'asola.
2. L'asola viene fatta passare attorno all'elemento da collegare.
3. Le due estremità dell'anello vengono fatte passare all'interno dell'asola stessa.
4. Applicando tensione al sistema, il nodo si serra automaticamente sull'elemento di supporto per effetto dell'attrito e della trazione.

Il nodo a bocca di lupo non richiede nodi permanenti sul filo guida e consente un collegamento efficace fintanto che viene mantenuta la tensione operativa.

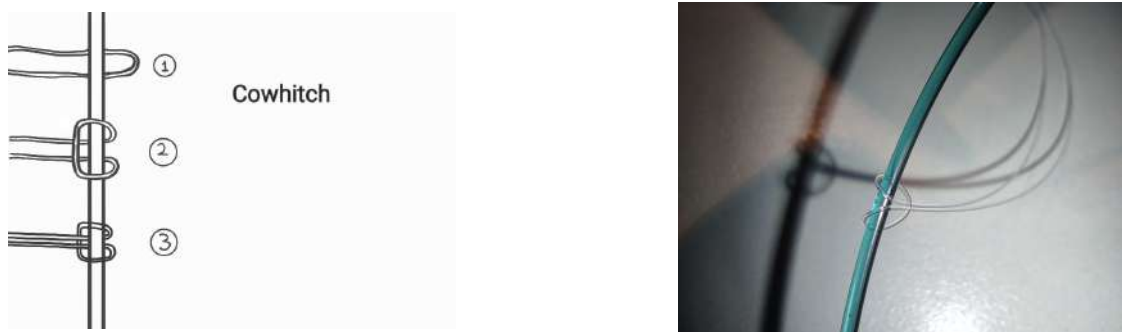


Figura 3.16: Istruzioni sul nodo a bocca di lupo, a destra esempio di nodo realizzato.

## Collegamento tra fili tiranti e fili guida

Il collegamento tra fili tiranti, configurati ad anello chiuso, e fili guida viene realizzato mediante nodo a bocca di lupo. La procedura varia in funzione dello stato di installazione dei fili guida.

### Caso A: fili guida non ancora montati

Nel caso in cui i fili guida non siano ancora legati al ricevitore(l'estremità inferiore):

1. L'anello viene fissato alla bobina del tensionatore mediante un breve spezzone di filo, realizzando un doppio o triplo nodo semplice.
2. Per aumentare l'affidabilità del fissaggio ed evitare sfilamenti accidentali, può essere applicata una minima quantità di adesivo sul nodo di bloccaggio.
3. Si procede ad avvolgere la coppia di fili, attenzione ad avvolgere nella stessa direzione gli altri tre avvolgitori
4. Successivamente si realizza il nodo a bocca di lupo sull'anello.
5. Il filo guida viene quindi fatto passare all'interno della bocca di lupo.
6. Applicando tensione al sistema, il nodo si serra automaticamente sul filo guida.

Questa configurazione consente un corretto posizionamento dell'anello sul tensionatore prima del collegamento definitivo con il filo guida.



Figura 3.17: A sinistra, realizzazione dell'asola, a destra, inserimento filo guida nell'asola.

### **Caso B: fili guida già montati**

Nel caso in cui i fili guida siano già installati nella struttura, la sequenza operativa deve essere modificata:

1. Si realizza inizialmente il nodo a bocca di lupo sull'anello chiuso.
2. Il nodo viene applicato direttamente attorno al filo guida già in posizione.
3. Si procede quindi al fissaggio alla bobina mediante spezzone di filo e nodo semplice, eventualmente consolidato con una minima quantità di adesivo.
4. Successivamente l'anello viene avvolto nel tensionatore.

Questa procedura è necessaria poiché, con il filo guida già montato, non è possibile inserirlo successivamente in un nodo già serrato.

Il collegamento così realizzato garantisce un trasferimento efficace della tensione tra tensionatore, filo tirante e filo guida, consentendo al contempo semplicità di montaggio e possibilità di regolazione.

# Capitolo 4

## Sperimentazioni con le soluzioni di sapone

Al fine di realizzare un canale stabile per la galleria aerodinamica a film di sapone, si è resa necessaria una fase preliminare di sperimentazione volta all'individuazione di una composizione adeguata della soluzione.

Sono state inizialmente considerate due ricette :

- ricetta proposta dal Science Museum di Londra(95% acqua, 3% sapone concentrato, 2% glicerina).
- ricetta proposta dal sito internet Red Ted Art[3](77% acqua, 20% sapone concentrato, 3% glicerina).

### 4.1 Metodologia sperimentale preliminare

Le soluzioni sono state preparate utilizzando:

- bicchierini in plastica da 150 ml come contenitori di prova;
- una bilancia digitale con precisione pari a 0,1 g;
- controllo dell'errore finale di composizione inferiore all'1%;
- cronometro digitale per la misura dei tempi di durata del film.
- glicerina vegetale e sapone non di marca.

La densità della glicerina vegetale è stata assunta pari a:

$$\rho_{\text{glicerina}} = 1,25 \text{ g/ml}$$

valore utilizzato per convertire correttamente le frazioni volumetriche in masse durante la preparazione.

Per ciascuna soluzione sono stati effettuati circa 10 tentativi di formazione del film, misurandone il tempo di vita medio. Si osserva che tale metodologia non è particolarmente rigorosa, ma risulta più che sufficiente per una valutazione comparativa preliminare.

Inoltre, sono state investigate variazioni sistematiche della concentrazione di glicerina e l'uso di acqua distillata.

Soluzione	Sapone [%]	Glicerina [%]	Acqua distillata	Durata film [s]
Museo Scienze di Londra	3	2	No	8
RedTedArt	20	3	No	8
Variante M.S.L	3	4	No	14
Variante M.S.L	3	2	Sì	8

Tabella 4.1: Risultati delle prove preliminari nei bicchieri.

Si osserva inoltre che, quando il film veniva disposto orizzontalmente, la durata risultava fino a quattro volte superiore rispetto alla configurazione verticale, indicando una forte influenza degli effetti gravitazionali sul drenaggio del film.



Figura 4.1: A sinistra, i provini delle soluzioni, a destra test di una soluzione, nota il film che drena in basso.

## 4.2 Risultati chiave

Dai risultati ottenuti emergono alcune osservazioni fondamentali:

- Il riposo della soluzione ha un effetto estremamente significativo sulla stabilità del film. La durata del film è aumentata da circa 1 secondo immediatamente dopo la preparazione fino a circa 8 secondi dopo 24 ore.
- L'aumento della concentrazione di glicerina ha prodotto un miglioramento sostanziale, portando la durata media del film fino a circa 14 secondi, inoltre questa soluzione ha permesso la creazione di bolle di sapone, a differenza delle altre.
- La variazione della concentrazione di sapone, nel range investigato, non ha mostrato effetti altrettanto marcati quanto la presenza di glicerina.
- L'utilizzo di acqua distillata non ha prodotto differenze significative rispetto all'acqua di rubinetto nelle condizioni testate.
- La stabilità del film risulta fortemente dipendente dalla configurazione geometrica e dall'orientamento, suggerendo che il drenaggio gravitazionale rappresenta uno dei principali meccanismi di rottura.

Questi risultati hanno permesso di identificare la glicerina come uno dei parametri più critici per il miglioramento delle prestazioni della soluzione.

### 4.3 Test in galleria

In seguito ai test preliminari sono stati eseguiti test direttamente sull'apparato.

Sapone [%]	Glicerina [%]	Tipo di sapone	Capacità di penetrazione	Ampiezza canale
3	0	Generico	Cilindro, diametro 0.5 mm	2 cm
20	0	Generico	Cilindro, diametro 5 mm	2.5 cm
10	5	Generico	Cilindro, diametro 5 mm,	2 cm
10	0	Generico	Cilindro, diametro 0.5 mm	2 cm
10	0	Di marca	Cilindro, diametro > 1cm	fino a 6 cm
20	0	Di marca	Cilindro, diametro > 1cm	fino a 6 cm
10	5	Di marca	Cilindro, diametro > 1cm	fino a 15 cm

Tabella 4.2: Risultati preliminari usando la galleria a film di sapone.

I risultati ottenuti mostrano che, sebbene la formazione di un film continuo sia possibile per tutte le soluzioni testate, la capacità di sostenere la formazione e l'espansione di un canale stabile dipende in modo significativo dalla qualità del sapone e come ci aspettavamo, dalla presenza di glicerina, infine la portata di flusso e il regime di moto del film anch'essi influenzano la resistenza del film a perforazione e la sua capacità di dilatarsi.

#### Influenza della qualità del sapone

Uno dei risultati più significativi emersi dalle prove sperimentali riguarda l'influenza della tipologia di sapone utilizzata. Il sapone generico ha mostrato prestazioni peggiori in tutti i casi, anche in presenza di glicerina, senza permettere la formazione di un canale stabile di dimensioni rilevanti.

Al contrario, l'utilizzo di un sapone commerciale di marca ha portato a un miglioramento sostanziale delle prestazioni del film. In questo caso è stato possibile ottenere una penetrazione con oggetti di diametro superiore a 1 cm e la formazione di un canale stabile con ampiezza fino a 6 cm.

#### Espansione del canale e influenza del regime di flusso

Un ulteriore aspetto rilevante osservato durante le prove riguarda l'influenza del regime di flusso sulla formazione e stabilità del canale.

In condizioni di bassa portata, corrispondenti a un regime prevalentemente laminare, il canale tende a rimanere limitato in ampiezza. Al contrario, operando inizialmente a portate più elevate, corrispondenti a un regime turbolento, è possibile ottenere espansioni più elevate. Infine, si è in grado di ridurre progressivamente la portata fino a ristabilire un regime laminare senza causare la rottura del film, generando un ciclo di isteresi.

## 4.4 Considerazioni finali

Al netto dei nostri test preliminari, si può affermare che per ottenere una soluzione che generi un film di sapone stabile e resiliente è necessario in primis un sapone per piatti concentrato e di marca e per secondo la glicerina. Le dosi che noi abbiamo poi usato sono 10% sapone concentrato, 5% glicerina, 85% acqua di rubinetto.

Concludendo, si sottolinea che questi sono test preliminari e c'è ancora margine di miglioramento, si suggerisce di testare altre combinazioni, magari con concentrazioni più elevate oppure più basse di sapone, valutare anche l'uso di acqua distillata e gomma di Guar, usata per fare bolle giganti.

# Capitolo 5

## Test a struttura inclinata

Trovata una soluzione saponata adeguata alle nostre esigenze, abbiamo verificato la capacità dell'apparato di lavorare con film inclinati. I risultati dei nostri test mostrano il corretto funzionamento anche ad elevati angoli.<sup>1</sup> Di contro si riscontra una maggiore difficoltà a formare il film e la ridotta capacità di recuperare la soluzione saponata.

Di seguito vengono mostrate varie immagini dell'apparato.



Figura 5.1: Telaio secondario estratto, con formazione di film inclinato

---

<sup>1</sup>ci si è spinti fino a 69 gradi di inclinazione

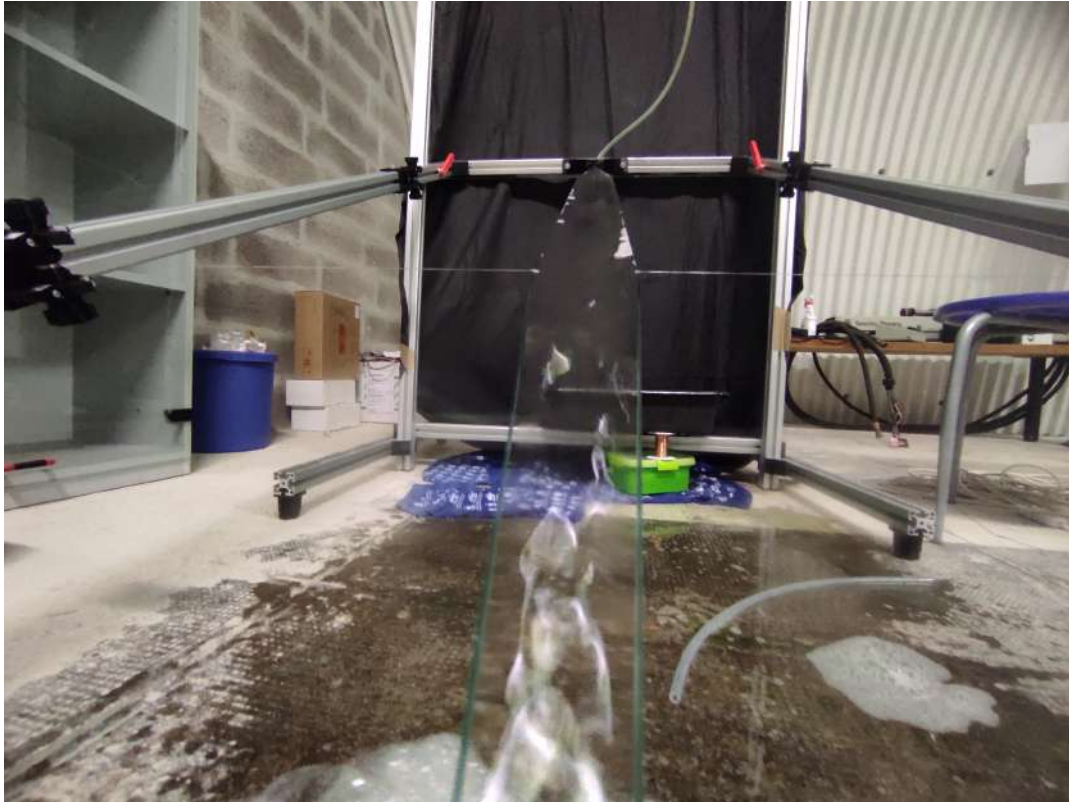


Figura 5.2: Primo piano del film inclinato in regime di moto turbolento.

# Capitolo 6

## Visualizzazioni

La visualizzazione di moti fluidodinamici nel film di sapone può essere effettuata mediante traccianti oppure mediante le frange di interferenza, causate dalla variazione in spessore nel film quando illuminato con una lampada monocromatica[5].

Per puro scopo dimostrativo abbiamo optato per la seconda opzione.

### 6.1 Configurazione usata

Per effettuare delle riprese ad alta velocità abbiamo montato un telo scuro al telaio, usando come illuminazione una lampada al sodio prima e un semplice led dopo. La telecamera usata è una Phantom Miro M340.



Figura 6.1: Immagine del telaio configurato per le riprese.

## 6.2 Istantanee con fotocamera normale

Con la giusta angolazione ed illuminazione, siamo comunque riusciti ad ottenere delle immagini notevoli con una normale fotocamera.

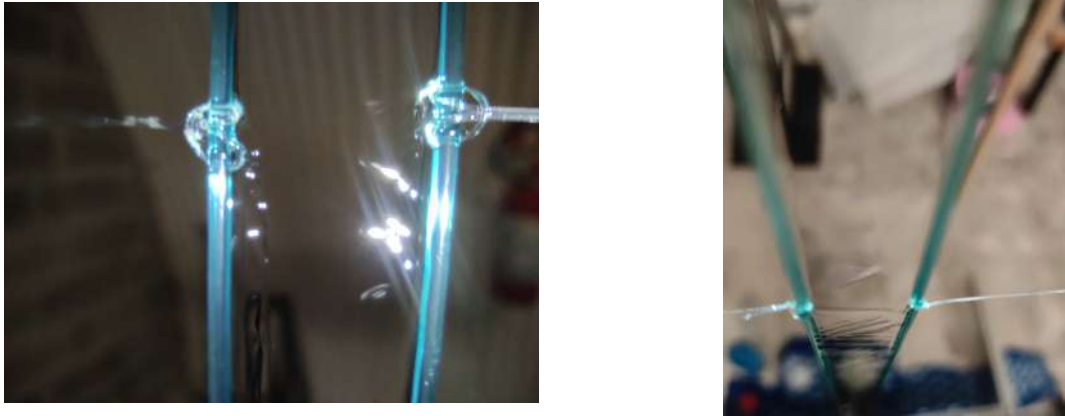


Figura 6.2: Immagini del film a distanza ravvicinata.



Figura 6.3: Interferenza nel film causata da un corpo estraneo.

### 6.3 Istantanee con fotocamera ad alta velocità

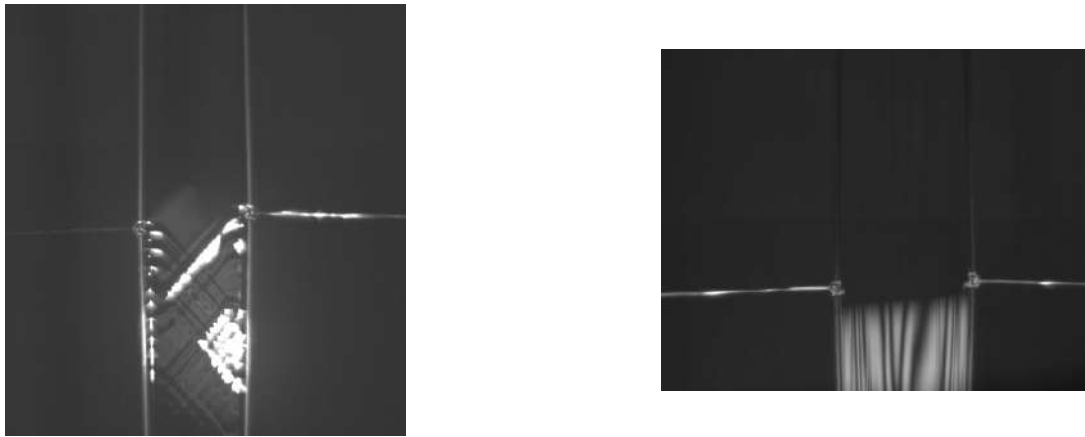


Figura 6.4: A sinistra interferenze causate dai nodi, illuminato con lampada a led, a destra film in condizioni stazionarie illuminato con la lampada al sodio, in assenza di portata.

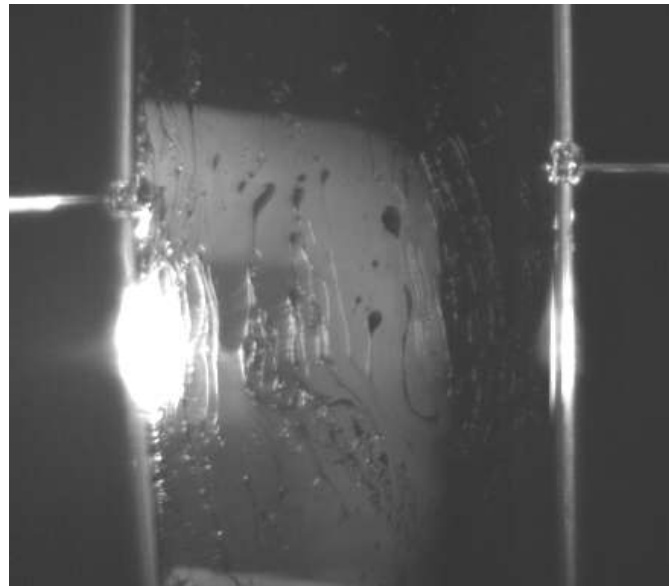


Figura 6.5: Film prossimo alla rottura, illuminato con la lampada a led.

# Capitolo 7

## Debolezze del setup e possibilità di miglioramento

In questa sezione vengono identificate le principali debolezze del setup attuale e proposte alcune possibili migliorie progettuali, con l'obiettivo di facilitare i test e ampliare i possibili esperimenti realizzabili.

### Lista delle possibili migliorie

Le principali migliorie individuate sono le seguenti:

- Riprogettazione di nozzle e ricevitore
- Progettazione di bracci telescopici
- Progettazione di un adattatore per bottiglie in pet da 1.5L;
- Implementazione di un sistema di ricircolo della soluzione mediante pompa;
- Introduzione di un sistema di riferimento locale con scala graduata;
- Integrazione di meccanismi a cric per la regolazione dei tensionatori;
- Implementazione di un sistema di controllo della temperatura della soluzione;
- Integrazione di attuatori acustici (speaker o trasduttori) per l'introduzione di perturbazioni controllate;

## 7.1 Riprogettazione di nozzle e ricevitore

Sebbene sufficienti per dimostrazioni e brevi test, per lunghi esperimenti il nozzle e ricevitore risultano inadeguati e necessitano di essere sovradimensionati, il nozzle perchè non è in grado di gestire le elevate portate necessarie in presenza di film ampi e regimi turbolenti, il ricevitore invece ad elevate portate vede una importante formazione di schiuma che eventualmente lo ottura.

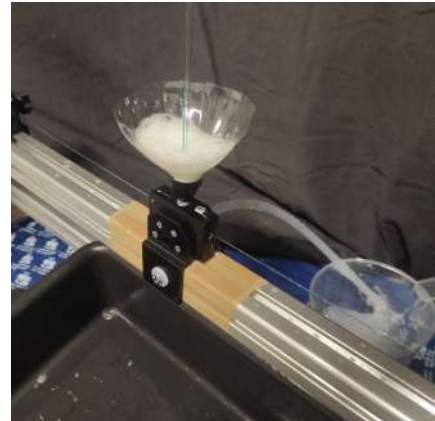
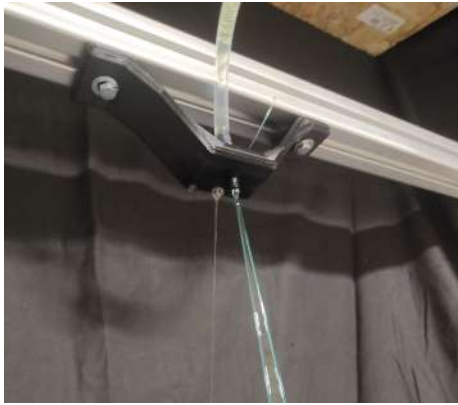


Figura 7.1: A sinistra, il nozzle con una cospicua perdita di soluzione, a destra formazione di schiuma nel ricevitore.

## 7.2 Progettazione di bracci telescopici

Durante i primi test per fare delle visualizzazioni, sono state evidenti le limitazioni della mancanza di bracci telescopici, utili sia per fissare dei provini, ma soprattutto per tenere eventuali luci o filtri, che richiedono angolazioni particolari vista la natura del film di sapone.

## 7.3 Progettazione di un adattatore per bottiglie in pet da 1.5L

Durante la sperimentazione delle varie soluzioni saponate abbiamo riscontrato che la tanica da 10L risulta scomoda, in quanto richiede preparazioni di grandi quantità di soluzione per funzionare correttamente. Un approccio migliore consisterebbe nell'uso di un adattatore con annesso rubinetto per bottiglie in pet da 1.5L, consentendo una sperimentazione più agevole e risparmio di materia prima.

## **7.4 Sistema di ricircolo della soluzione**

L'attuale configurazione prevede l'alimentazione per gravità da una tanica posta nella parte superiore della struttura. Durante il funzionamento, il livello della soluzione diminuisce progressivamente, causando una variazione della pressione idrostatica e quindi della velocità del flusso.

L'introduzione di una pompa di ricircolo permetterebbe di mantenere costante il livello della soluzione nella tanica, garantendo condizioni di flusso più stazionarie e migliorando la ripetibilità degli esperimenti. Inoltre, consentirebbe un funzionamento continuo del dispositivo senza interventi manuali frequenti.

## **7.5 Sistema di riferimento locale**

Sebbene in fase di prototipazione non è stato utile, nelle future fasi sperimentative, risulta vitale implementare un sistema di riferimento locale, specialmente in condizioni di frequenti modifiche del volume di controllo o in caso di uso di tecnologia particle image velocimetry.

## **7.6 Meccanismi a cric per i tensionatori**

Questo è un miglioramento puramente di comodità.

## **7.7 Sistema di controllo della temperatura**

Le proprietà fisiche della soluzione saponata, come viscosità e tensione superficiale, dipendono anche dalla temperatura. Attualmente, la temperatura non è controllata attivamente, il che può introdurre variabilità nelle condizioni sperimentali.

L'introduzione di un sistema di controllo termico permetterebbe di mantenere condizioni più stabili e di esplorare nuovi regimi sperimentali, ad esempio flussi a basse temperature.

## **7.8 Sistema di perturbazione controllata mediante speaker**

L'integrazione di uno o più speaker o trasduttori permetterebbe di introdurre vibrazioni controllate nella struttura o nei fili guida. Questo consentirebbe di studiare la risposta del flusso a perturbazioni esterne controllate.

# Conclusioni

Lo scopo di questa tesi consiste nella realizzazione di uno strumento innovativo, la galleria aerodinamica a film di sapone, con l'obiettivo di aprire nuove possibilità sperimentali nello studio dei flussi turbolenti, fenomeni al centro della maggior parte degli esperimenti condotti presso il laboratorio internazionale CICLoPE, situato nelle ex Gallerie Caproni di Predappio (FC).

Parallelamente, è stato deciso di introdurre miglioramenti e innovazioni significative. Questa volontà si è concretizzata nell'integrazione di un'inclinazione variabile della struttura, che offre un ulteriore grado di libertà negli esperimenti, e nella ricerca di una soluzione in grado di generare un film stabile e resiliente.

# Appendice A

## Manuale d'uso della struttura

### A.1 Definizione del volume di controllo

Per definire il volume di controllo, allentare i bulloni che connettono i tensionatori al telaietto e assicurarsi che la lenza non sia in tensione. Posizionare i tensionatori, per tensionare i tiranti è sufficiente avvolgere le manopole. In caso sono troppo dure da muovere o troppo morbide da impedire al tirante di tensionarsi, è possibile regolare la frizione tenendo ferma la manopola del bullone e muovendo quella del dado. Assicurarsi che la quantità di filo avvolto è uguale per tutti e quattro gli avvolgitori.



Figura A.1: Allentare i bulloni e, per agevolare lo scorrimento, applicare pressione su entrambi i bulloni.

## A.2 Riempimento della tanica con soluzione saponata

Riempire la tanica con la soluzione saponata preparata in precedenza, ricorda di far riposare la soluzione almeno un giorno. Collegare il rubinetto al tubo in silicone, potrebbe essere necessaria una scaletta.



Figura A.2: Evitare di tensionare troppo il tubo in silicone onde evitare la rottura del nozzle.

## A.3 Pulizia dei fili guida del flusso

E' importante pulire con alcool l'apparato, specialmente i fili guida, al fine di limitare le impurità e rimuovere accumuli di sapone che vanno a contatto con la soluzione.

## A.4 Apertura del rubinetto e formazione della lamina

Aprire leggermente il rubinetto della tanica, una volta formato la lamina, è possibile incrementare a piacimento. Per formare la lamina, si parte dai fili guida uniti e si procede ad aprire il film mediante i tensionatori, procedere con delicatezza per non rompere prematuramente il film.

## A.5 Inclinazione della struttura (se necessario)

E' possibile inclinare la struttura allentando leggermente i bulloni che connettono il telaio al telaio principale, regolando così l'angolo di inclinazione desiderato. E' consigliabile eseguire questa operazione in due, raggiunta l'inclinazione voluta, serrare le leve e inizializzare il flusso, sono consigliati vari stracci.



Figura A.3: Immagine della struttura inclinata.

## **A.6 Extra**

### **Procedura Inversa**

E' anche possibile partire già con i fili guida estesi e guidare la formazione del film aiutandosi con un righello o simile

### **Degradazione soluzione**

Nel tempo la soluzione saponata potrebbe degradare di qualità, assorbendo polvere, microplastiche ecc.

Il sintomo più evidente è la scarsa durata del film , è consigliabile pre-pulire tutto l'apparato prima di usarlo, in ogni caso eventualmente la soluzione andrà sostituita.

# Appendice B

## Digital particle tracking velocimeter

Nelle fasi successive di sperimentazione, sarà necessaria la stima della velocità di scorrimento del film di sapone. Il metodo più intuitivo e facile da adottare risulta mediante traccianti e videocamera ad alta velocità.

Questo metodo richiede una fase di elaborazione dei dati acquisiti. Il metodo più comune consiste nella **misurazione manuale frame per frame**, in cui l'operatore segue visivamente le particelle nei singoli fotogrammi per stimarne la posizione e, di conseguenza, la velocità approssimativa.

Questo approccio è vantaggioso per avere stime qualitative senza ulteriore strumentazione, ma per un uso più estensivo dell'apparato presenta svariate **criticità**:

1. **Tempo di elaborazione elevato**: analizzare centinaia o migliaia di fotogrammi richiede un impegno manuale enorme, rendendo il metodo poco pratico per esperimenti lunghi o ripetitivi.
2. **Errore umano**: la stima della posizione delle particelle è soggetta a discrezionalità e a variazioni tra operatori diversi, introducendo incertezza e riducendo la riproducibilità dei risultati.
3. **Bassa risoluzione temporale**: seguire manualmente le particelle limita la frequenza di campionamento effettiva, riducendo la capacità di catturare fluttuazioni rapide della velocità, tipiche dei flussi turbolenti.

Queste limitazioni possono essere superate con **metodi automatizzati di Particle Tracking Velocimetry (PTV)**, che sfruttano algoritmi di elaborazione delle immagini per tracciare automaticamente le particelle frame per frame.

Il tracciamento automatico migliora sia l'accuratezza che l'efficienza dell'analisi oltre a garantire una migliore costanza dei risultati.

Il vantaggio tra tutti più apprezzabile è la velocità di analisi, resa possibile dalla potenza dei calcolatori odierni.

## B.1 Il nostro PIV

Al netto delle considerazioni fatte sopra abbiamo scelto di sviluppare un rudimentale programma per processare i fotogrammi in maniera automatica.

Di seguito ne verrà descritto il funzionamento e nella prossima sezione come operarlo.

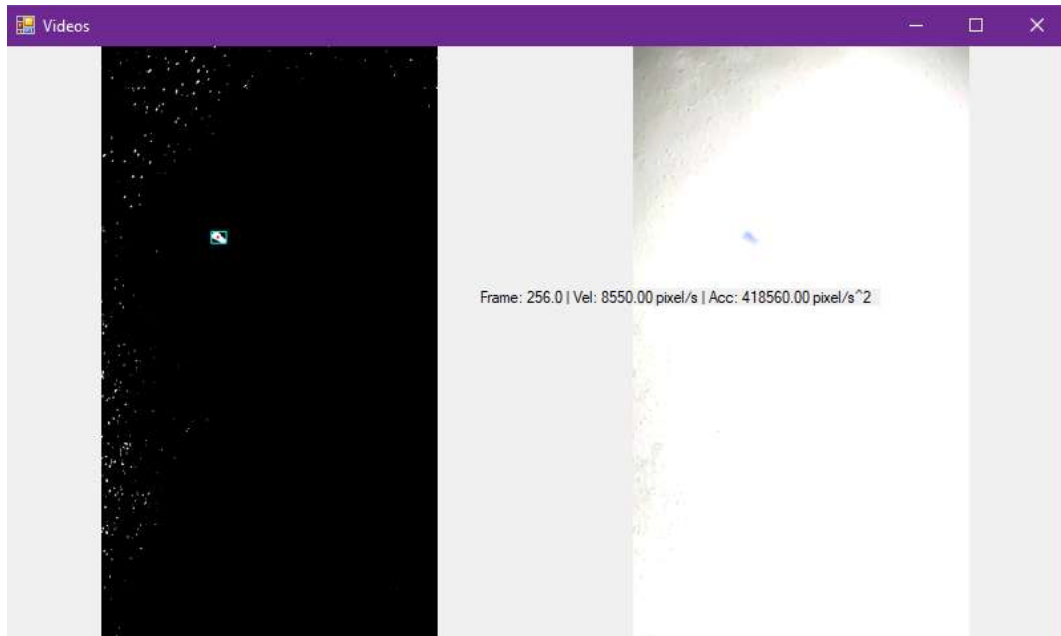


Figura B.1: Esempio del programma realizzato.

## Ecosistema del software

Il software è stato sviluppato per il sistema operativo **Windows** utilizzando il framework **.NET Framework 4.8** e il linguaggio di programmazione **C#**. L'applicazione è strutturata come una tipica interfaccia grafica Windows Forms (*WinForms*), che permette di creare finestre interattive contenenti controlli grafici come *PictureBox*, *Label*, *TextBox* e *Button*.

Per l'elaborazione delle immagini e dei video, il programma si avvale della libreria **Emgu CV**, un wrapper per **C#** di *OpenCV*. Questa libreria consente di eseguire operazioni di soglia adattativa, rilevamento contorni, calcolo dei momenti per centroidi e rettangoli, e di disegnare direttamente su matrici immagini (*Mat*) in modo efficiente.

## Logica del programma

Il programma è pensato per prendere in input un video, pulire i frame, analizzarli e restituire la posizione approssimativa del tracciante e frame di appartenenza dell'informazione.

Nella seconda parte le informazioni vengono elaborate stimando dimensione (in pixel) del tracciante e velocità<sup>1</sup>.

Di seguito elenchiamo le varie funzioni chiave e in seguito approfondiamo le più importanti:

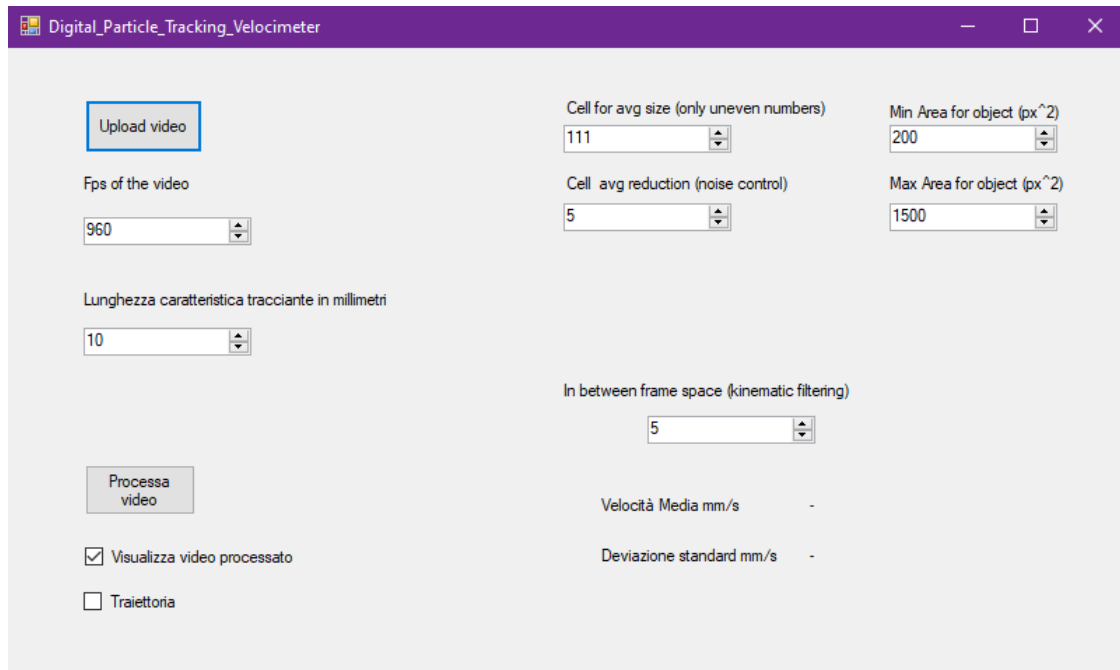


Figura B.2: Interfaccia del programma.

---

<sup>1</sup>è prevista anche l'accelerazione ma va al di fuori degli scopi della tesi e richiede ulteriore lavoro.

## B.2 Funzioni principali e gestione dei frame

Il programma è strutturato attorno a funzioni principali per l'elaborazione dei video e la gestione dei traccianti. Di seguito è riportata una panoramica delle funzioni più significative:

- **Cleaner()**: converte un frame in scala di grigi e applica una soglia adattativa per ottenere un'immagine binaria pulita, pronta per l'analisi dei contorni.
- **Analizer()**: rileva i contorni nella matrice binaria, calcola rettangoli di delimitazione e centroidi dei traccianti, infine restituisce una lista di rilevamenti validi filtrati per area.
- **Targheter()** : disegna rettangoli azzurri e centroidi rossi sui frame, a scopo di visualizzazione dei traccianti rilevati.
- **ComputeKinematics()** : calcola velocità e accelerazione dei traccianti a partire dalle loro posizioni nei frame, restituendo una lista di valori cinematica.
- **kinaverages()** : calcola la velocità media e la deviazione standard della velocità dai dati cinematica raccolti, adattando i valori alle unità reali (mm/s).
- **Timer\_Tick()** : il programma prevede la possibilità di visualizzare in tempo reale l'analisi del video per fini di calibrazione e feedback, questa funzione fa uso delle funzioni precedenti frame per frame.

## Funzione Cleaner

La funzione `Cleaner` prende in input un singolo frame video sotto forma di matrice immagine (*Mat*) e restituisce una matrice binaria **invertita**<sup>2</sup> pulita, adatta per l'analisi dei contorni dei traccianti.

### Input

- **Clean (Mat)**: matrice contenente il frame corrente del video in scala di colore BGR.
- Parametri globali della classe utilizzati all'interno della funzione:
  - **CleanCellsize**: dimensione della finestra locale (kernel) utilizzata per il calcolo della media gaussiana locale.
  - **CleanAvgReduce**: valore sottratto alla media locale per la soglia adattativa.

### Elaborazione

La funzione esegue due operazioni principali:

1. **Conversione in scala di grigi**
2. **Soglia adattativa Gaussiana** (*Adaptive Threshold*):

$$B(x, y) = \begin{cases} 255 & \text{se } I(x, y) \leq \mu_{x,y} - C \\ 0 & \text{altrimenti} \end{cases}$$

dove:

- $I(x, y)$  è l'intensità del pixel in posizione  $(x, y)$ ,
- $\mu_{x,y}$  è la media dei pixel nella finestra locale di dimensione **CleanCellsize** centrata in  $(x, y)$ ,
- $C$  è il parametro **CleanAvgReduce** che riduce la soglia locale per limitare il rumore.

### Output

La funzione restituisce una matrice binaria  $B(x, y)$  nella quale:

- i pixel appartenenti ai traccianti hanno valore 255 (bianco),
- il background ha valore 0 (nero).

Questo passaggio permette di ottenere una segmentazione netta dei traccianti, facilitando il successivo rilevamento dei contorni e il calcolo delle proprietà geometriche, come rettangoli di delimitazione e centroidi.

---

<sup>2</sup>Il programma è pensato per avere traccianti scuri su sfondo bianco, è possibile comunque il contrario cambiando `ThresholdType.BinaryInv` in `ThresholdType.Binary`

# Funzione Analyzer

La funzione `Analyzer` ha il compito di identificare e caratterizzare geometricamente i traccianti presenti in un frame binario elaborato.

**Attenzione** la funzione è pensata per restituire un solo centroide per frame, se ne individua molteplici, il frame verrà scartato.

## Input

- **binaryMat (Mat)**: matrice binaria restituita dalla funzione `Cleaner`
- Parametri globali della classe:
  - `minContourArea`: area minima del contorno per considerarlo valido.
  - `maxContourArea`: area massima del contorno per escludere rilevamenti anomali.
  - `frameIndex`: indice corrente del frame nel video.

## Elaborazione

Il processo di analisi può essere descritto come segue:

### 1. Rilevamento contorni:

$$\{\mathcal{C}_i\} = \text{FindContours}(B)$$

dove  $\mathcal{C}_i$  è l'insieme di punti appartenenti al contorno  $i$ -esimo.

### 2. Filtraggio per area:

si considerano solo contorni le cui aree sono tali  $\text{minContourArea} \leq A_i \leq \text{maxContourArea}$

### 3. Calcolo rettangolo di delimitazione:

$$R_i = \text{BoundingRectangle}(\mathcal{C}_i)$$

La lista di rettangoli poi ottenuta verrà usata per stimare una dimensione caratteristica del tracciante in pixel che verrà confrontata con la dimensione caratteristica inserita dall'utente, per stimare la dimensione in mm di un pixel, ed infine convertire la velocità in mm/s.

### 4. Calcolo centroide tramite momenti:

I momenti spaziali  $M_{pq}$  del contorno sono calcolati come:

$$M_{pq} = \sum_{(x,y) \in \mathcal{C}_i} x^p y^q$$

Il centroide  $(c_x, c_y)$  è dato da:

$$c_x = \frac{M_{10}}{M_{00}}, \quad c_y = \frac{M_{01}}{M_{00}}$$

dove  $M_{00}$  rappresenta l'area del contorno.

## Output

La funzione restituisce una lista contenente frame di appartenenza, rettangolo che meglio descrive il contorno rilevato e posizione del centroide.

## Osservazioni

L'approccio utilizzato sfrutta solo contorni esterni per ridurre il rumore e accelerare l'elaborazione. Il filtraggio per area consente di scartare oggetti troppo piccoli (possibile rumore) o troppo grandi (anomalie o elementi di sfondo), garantendo un rilevamento robusto dei traccianti di interesse.

## Funzione `ComputeKinematics`

La funzione calcola le grandezze cinematiche elementari — velocità scalare e accelerazione scalare risultante — restituendo una lista di triple

$$(\text{frame}, v, a)$$

dove `frame` è l'indice del frame associato alla misura cinematica,  $v$  è la velocità (espresso in pixel/s nel codice) e  $a$  è l'accelerazione (pixel/s<sup>2</sup>).

## Principio numerico

La velocità è valutata con una differenza spaziale su due istantanee separate nel tempo:

$$v(t) \approx \frac{\|c(t + \Delta t) - c(t)\|}{\Delta t},$$

dove  $\|\cdot\|$  è la norma euclidea in pixel e  $\Delta t$  è l'intervallo temporale tra i due frame misurato in secondi. Nel codice:

$$\Delta t = \frac{n_j - n_i}{\text{FPS}},$$

con  $n_i$  e  $n_j$  gli indici dei due frame usati per la derivata e FPS il frame rate impostato.

L'accelerazione viene ottenuta per differenza finita delle velocità calcolate su coppie successive:

$$a \approx \frac{v_{k+1} - v_k}{\Delta t_v},$$

dove  $\Delta t_v$  è il tempo fra le due misure di velocità (derivate su coppie di frame distanziate).

## Ruolo del parametro `Finestra`

Nel codice il parametro `Finestra` determina la separazione temporale fra i due frame usati per il calcolo della velocità: con

$$\text{Finestra} = w$$

la velocità viene calcolata tra il punto al frame  $n$  e il punto al frame  $n + (w + 1)$ . In altri termini, si considerano coppie  $(n_i, n_{i+1+w})$  come basi per la derivata. Ad esempio, con  $w = 5$  la velocità è valutata fra frame 1 e 6, fra frame 2 e 7, ecc.

Questo comportamento ha due conseguenze importanti:

- **Riduzione del rumore statistico:** allungando la baseline temporale  $\Delta t$  l'errore relativo dato dall'incertezza di localizzazione del centroide si propaga meno alla stima della velocità (errore tipico sulla velocità  $\propto$  errore posizione /  $\Delta t$ ). Quindi valori maggiori di **Finestra** producono stime di velocità meno rumorose.
- **Perdita di risoluzione temporale:** aumentando **Finestra** la stima diventa meno sensibile a variazioni rapide; la reattività alle transizioni brusche diminuisce. Esiste quindi un compromesso tra stabilità e risoluzione temporale.

### Scelte implementative e condizioni al contorno

- La funzione richiede un numero minimo di campioni: nel codice è imposto che la lista di input contenga almeno  $3 + \text{Finestra}$  elementi per poter calcolare velocità e accelerazione. Se questa condizione non è verificata la funzione ritorna `null`.
- Per ogni coppia valida  $(i, i + 1 + w)$  la velocità calcolata è associata all'indice di frame  $n_{i+1+w}$ ; successivamente si calcola l'accelerazione come differenza tra velocità successive usando il tempo effettivo tra i frame delle due misure di velocità.
- Il codice lavora in unità di *pixel* e *frame*; la conversione in unità fisiche (es. mm/s) è effettuata a valle moltiplicando per il fattore di scala `mm_su_px`.
- Si effettua un controllo implicito su  $\Delta t$  (derivata del numero di frame); è necessario evitare divisioni per zero qualora due misure collassino sullo stesso indice frame.

### Pro e contro dell'approccio

**Pro:** semplice da implementare, robusto contro rumore di localizzazione dei centroidi grazie alla baseline temporale; richiede pochi calcoli e si adatta bene a pipeline in tempo reale.

**Contro:** stima meno reattiva a cambi di moto rapidi; l'accuratezza dipende dalla corretta scelta di **Finestra** e del frame rate effettivo (**FPS**);

### Output

La funzione restituisce una lista di triple  $(n, v, a)$  con:

- $n$  : indice del frame a cui la misura è riferita;
- $v$  : velocità risultante in pixel/s (da convertire in mm/s moltiplicando per `mm_su_px`);

- $a$  : accelerazione risultante in pixel/s<sup>2</sup>.

Questa formulazione rende esplicito l'effetto di **Finestra** come meccanismo semplice ma efficace di *temporal baseline averaging*, utile per ridurre il rumore.

## B.3 Istruzioni per l'uso del software

Questa sezione descrive il corretto utilizzo del software di analisi cinematica sviluppato in ambiente *Windows Forms* (.NET Framework 4.8) con libreria *Emgu CV*.

### Requisiti del video

Per ottenere misure affidabili è necessario che il video soddisfi alcuni requisiti fondamentali:

- **Alto framerate:** almeno 120 fps, consigliati 960 fps per catturare correttamente il moto rapido del tracciante.
- **Alto contrasto:** la particella deve essere nettamente distinguibile dal fondo; preferibile una **particella nera su fondo bianco**. E' possibile invertire questa cosa agendo sul codice sorgente.
- **Sfondo uniforme:** riduce il rumore nella sogliatura adattiva e limita falsi contorni.
- **Orientamento verticale del video:** consigliato per visualizzare al meglio traiettoria e bounding box.

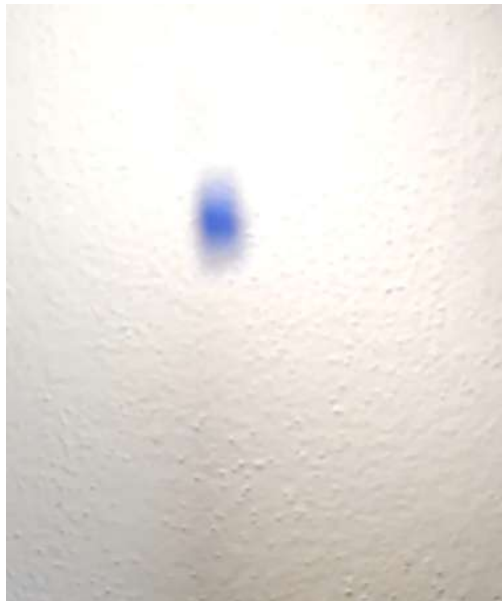


Figura B.3: Il programma è capace di gestire anche riprese sub ottimali.

## Caricamento del video

Il video viene caricato tramite il pulsante *Upload Video*. E' necessario poi modificare il selettore degli fps affinché combaci con quelli del video.

## Calibrazione dell'immagine

Prima di avviare l'analisi, occorre definire alcuni parametri fondamentali:

**Dimensione della cella di filtraggio** La funzione di pre-processing (`Clean()`) applica una *soglia adattiva* basata su un filtro locale di dimensione variabile. È consigliabile impostare una dimensione della cella **simile alla dimensione in pixel della particella tracciante**. Un valore troppo grande produce immagini sgranate e peggiora il rumore, mentre uno troppo piccolo rischia di "mangiarti" il tracciante.

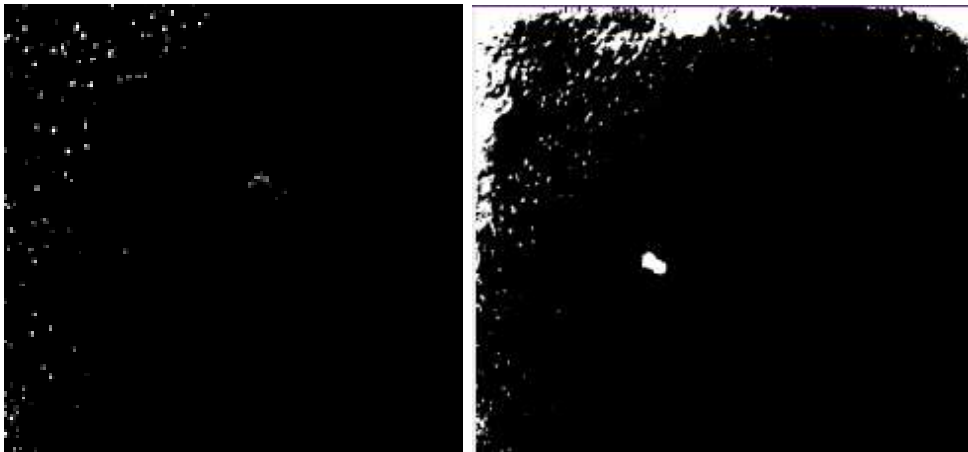


Figura B.4: Esempio di cella troppo piccola a sinistra e troppo grande a destra.

**Filtro di rumore** L'utente può specificare un valore di **cell avg reduction** che controlla l'aggressività del filtraggio dell'immagine. Valori più alti eliminano rumore residuo ma rischiano di "sgonfiare" la particella, non avere comunque paura ad usarlo, è molto efficace.

**Area minima e massima** Per ridurre falsi positivi vengono scartati tutti i contorni con area al di fuori di un intervallo scelto dall'utente. L'area è misurata in  $\text{pixel}^2$ .

**Attenzione, se vengono rilevati 2 traccianti in un frame, verranno scartati.**

**Lunghezza caratteristica** L'utente deve inserire la lunghezza fisica del tracciante (es. diametro della sfera), in millimetri. Questa dimensione consente di convertire i pixel in unità fisiche tramite calibrazione.

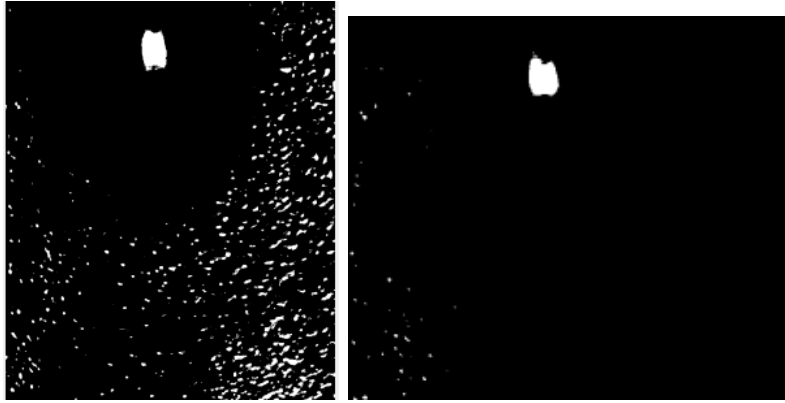


Figura B.5: A sinistra senza filtro, a destra con filtro.

### Parametri di analisi

**Spazio tra frame: In between frame space** Il parametro *In between frame space* definisce la distanza temporale tra due frame usati per calcolare la velocità:

$$v_k = \frac{x_{k+\Delta n} - x_k}{\Delta t}, \quad \Delta n = \text{finestra}$$

Permette di usare campioni più distanti tra loro, filtrando il rumore:

- con  $\Delta n = 1$ , velocità molto rumorosa;
- con  $\Delta n = 5$ , si effettua una differenza più ampia, aumentando il rapporto segnale-rumore.

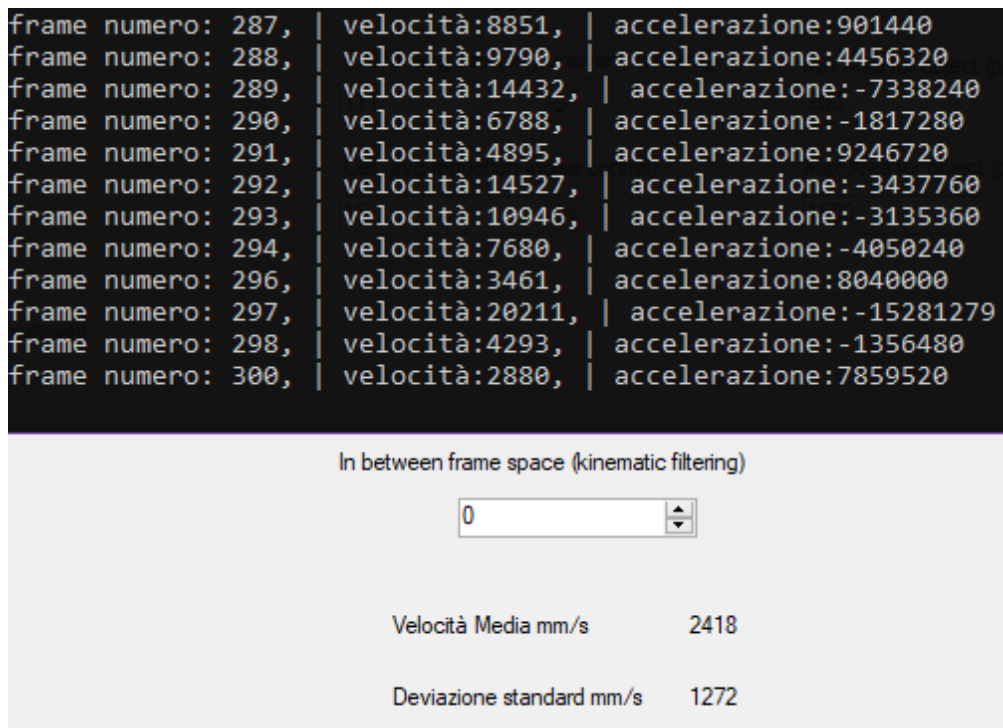


Figura B.6: Simulazione con la finestra = 0, nota l'instabilità della velocità

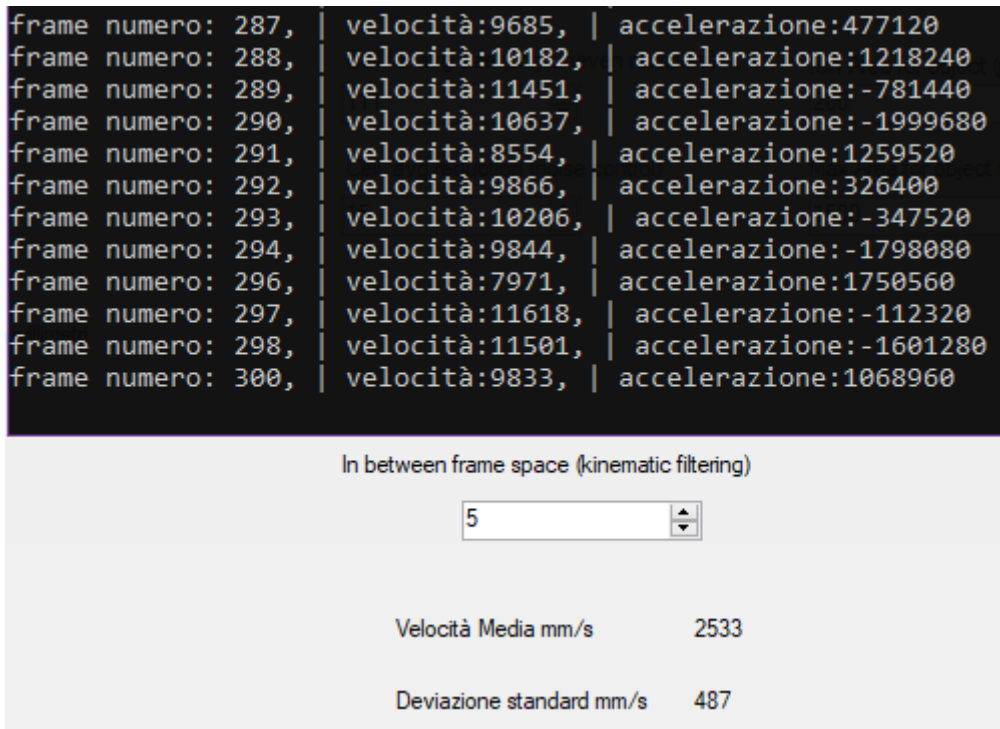


Figura B.7: Simulazione con finestra = 5,i dati risultano più stabili e coerenti.

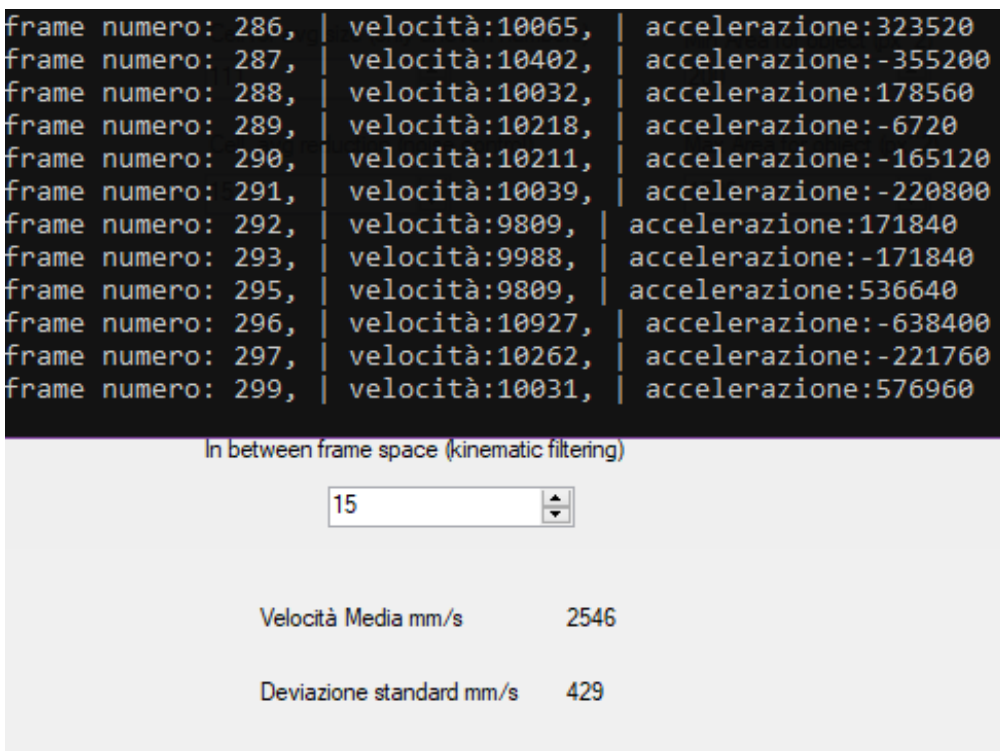


Figura B.8: A riprova della bontà dei risultati, con una finestra molto grande il risultato non discosta da quello precedente.

**Un'ulteriore osservazione** si potrebbe fare considerando la deviazione standard dovuta all'accelerazione di gravità, considerando 80 frame campionati su un video a

960 fps , otteniamo un'accelerazione di circa  $10m/s^2$  , che tenendo conto della misura approssimata della dimensione del tracciante e dell'algoritmo che ne ricostruisce la dimensione in pixel, è un risultato notevole.

### Opzioni di visualizzazione

Il programma fornisce due checkbox che controllano quali informazioni mostrare:

- **Visualizza video:**riduce la velocità di calcolo ma consente la visualizzazione del video originale, affiancato con quello elaborato, ai fini della calibrazione si consiglia di lasciarlo acceso.
- **Visualizza traiettoria:** disegna la traiettoria cumulativa del tracciante sul secondo riquadro.

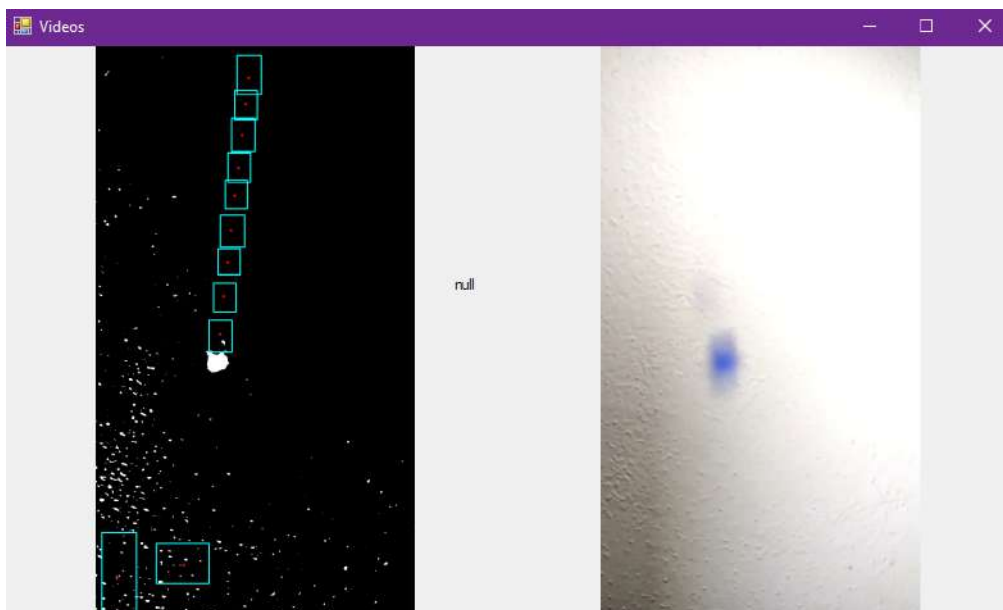


Figura B.9: Esempio di tracciamento con bounding box e traiettoria, nota come sono stati intercettati centroidi dovuti a rumore del video.

# Bibliografia

- [1] <https://www.funsci.it/files/Fenomeni-di-superficie-e-colloidi.pdf>
- [2] Chronicles of foam films, G. Gochev , D. Platikanov , R. Miller
- [3] <https://www.redtedart.com/bubble-recipe/>
- [4] Conducting fluid dynamics experiments with vertically falling soap films, M. A. Rutgers
- [5] Wake visualization of a heavy pitching foil, Florian T.Muijres Æ David Lentink
- [6] Y. Couder. Two-dimensional grid turbulence in a thin liquid film. *Journal de Physique Lettres*, 1984, 45 (8), pp.353-360. [ff10.1051/jphyslet:01984004508035300ff](https://doi.org/10.1051/jphyslet:01984004508035300ff). [ffjpa-00232354](https://doi.org/10.1051/jphyslet:01984004508035300ff)
- [7] *The Ashley Book of Knots*, Doubleday, New York, 1944. ISBN 0-385-04025-3., Ashley, C. W.