

POLITECNICO DI MILANO

Facoltà di Ingegneria Industriale

Corso di laurea in Ingegneria Aeronautica



Analisi sperimentale preliminare di un dispositivo innovativo
per il mixing turbolento.

Relatore: Prof. Maurizio Quadrio

Autore: Francesco Pasqua 731113

Anno accademico 2010-2011

Abstract

This thesis is concerned with the planning, project and construction of an experimental set-up, meant to be the starting point for the study of an innovative turbulent mixer.

It is a starting point for a deeper study of the mixing phenomena in a cylindrical geometry with an helicoidal spring inside.

The thesis' structure follows conceptually the made work phases.

The introduction justifies the utility of a deeper study of mixing phenomena in general.

Then the original prototype, built by Professor Yuli Surpin, is shown and the modifications and adaptations made are explicated. In Chapter 3 the preliminary study, the project and the construction of the experimental set-up are presented.

In Chapter 4 the experimental data of the torque measures and of the flow field visualizations are shown.

The good indications provided by the torque measures, showing a substantial reduction of the torque itself in the free spring case, and the graphics obtained from the visualizations' study, which provide some interesting and favourable considerations, even not conclusive, fuel the next steps of the experimental study.

At the end the next steps to bring up the experimental campaign and so to reach a deeper knowledge of the flow field around the spring and of its mixing properties are suggested.

Sommario

Questa tesi affronta la pianificazione, il progetto, la messa di opera di un set-up sperimentale per lo studio di un innovativo mixer turbolento.

Inoltre si colloca come inizio di uno studio più approfondito dei fenomeni di mixing in una geometria cilindrica con molla elicoidale.

La struttura della tesi segue concettualmente le fasi del lavoro svolto.

Nell'introduzione si giustifica l'utilità di uno studio approfondito dei fenomeni di miscelamento.

Successivamente viene presentato il prototipo originale, progettato dal Professor Yuli Surpin, a partire dal quale sono state effettuate le modifiche e gli adattamenti utili al nostro caso. Nel Capitolo 3 viene riportato tutto il lavoro di studio preliminare, progetto e costruzione del set-up sperimentale.

Nel Capitolo 4 vengono presentati i dati relativi alle misure sperimentali di coppia e alle visualizzazioni del campo di moto.

Le confortanti indicazioni date dai risultati delle misure di coppia, che ne indicano una sostanziale diminuzione nel caso di molla libera, ed i grafici ottenuti dallo studio delle visualizzazioni, che, anche se non conclusivi, forniscono qualche interessante considerazione, sono di buon auspicio per il prosieguo dello studio sperimentale.

Infine si suggeriscono i successivi passi da fare per proseguire sulla strada intrapresa e giungere ad una conoscenza più approfondita del campo di moto attorno alla molla e delle sue proprietà di mescolamento.

Indice

1	Introduzione	13
1.1	Il mixing	13
1.2	Scopo del lavoro	16
2	Un dispositivo innovativo	17
2.1	Stato dell'arte	17
2.2	Struttura, cinematica e dinamica del dispositivo	18
2.2.1	Struttura	18
2.2.2	Cinematica	18
2.2.3	Dinamica	20
2.2.4	Modalità d'utilizzo inversa	21
2.3	Rilevazioni sperimentali	22
2.3.1	Il dispositivo auto-movente	22
2.3.2	Un altro pipe-crawler	26
2.3.3	Lavoro futuro su questo tipo di dispositivi	28
3	Progettazione dell'esperimento	29
3.1	Studio della configurazione di prova	29
3.2	Scelta delle misure da effettuare	31
3.2.1	Misure di coppia	33
3.2.2	Visualizzazioni del campo di moto	33
3.3	Disegno 3D	34
3.3.1	Apparecchiatura completa	34
3.3.2	Piattelli	35
3.3.3	Giunto rigido	35
3.3.4	Piastra di fissaggio	36
3.4	Produzione e assemblaggio dei componenti	36
4	Risultati delle prove	39
4.1	Misure di coppia	39
4.1.1	Acquisizione dati	40
4.1.2	Grafici	40
4.2	Visualizzazioni del campo di moto	43
4.2.1	Two-frame Particle Tracking Velocimetry	44
4.2.2	Case "Fixed"	46

4.2.3	Case “Free”	62
5	Conclusioni e sviluppi futuri	79
5.1	Conclusioni	79
5.2	Sviluppi futuri	79

Elenco delle figure

1.1	Mixer per industria alimentare.	14
1.2	Altro esempio di mixer per industria alimentare.	14
1.3	Miscelatore per vernici.	14
1.4	Parte della macchina per circolazione extra-corporea (CEC) adibita all'ossigenazione e debollaggio del sangue.	15
1.5	Mixer da cucina.	15
2.1	Molla ritorta a doppia elica.	18
2.2	PREP (Pure Rolling Elastic Propelling) inserito in un tubo.	19
2.3	Geometria della molla a doppia elica di figura 2.1 inserita nel tubo, come in figura 2.2.	19
2.4	$\beta(\alpha)$ con $D_i = 60mm$, $d = 50mm$	20
2.5	Schema delle forze che causano il movimento dell'apparecchio all'interno di un tubo inclinato.	21
2.6	Struttura inversa dell'apparecchio.	22
2.7	Pipe-crawler.	22
2.8	Dipendenza dell'attrito dalla velocità.	23
2.9	Modello semplificato del pipe-crawler.	23
2.10	Dipendenza $t_1(A)$ calcolata a partire dall'equazione 2.10.	24
2.11	Spostamento e velocità del dispositivo.	26
2.12	Pipe-crawler alternativo.	26
2.13	Vista d'insieme del dispositivo alternativo inserito nel tubo.	27
3.1	Motore.	30
3.2	Azionamento elettrico.	30
3.3	Servoamplificatore.	30
3.4	Riduttore angolare.	31
3.5	Giunto elastico a soffietto.	32
3.6	Mandrino.	32
3.7	Torsiometro HBM T20 WN.	33
3.8	Assieme della struttura completa.	34
3.9	Disegno 3D del piattello di fissaggio.	35
3.10	Disegno 3D del giunto rigido.	35
3.11	Disegno 3D della piastra di fissaggio.	36
3.12	Insieme di molla e piattelli.	37

3.13	Molla ritorta fissata sull'albero.	38
4.1	Sistema di acquisizione USB NI cDAQ-9172.	40
4.2	Case 1 - Confronto fra molla "Free" e "Fixed".	41
4.3	Case 2 - Confronto fra molla "Free" e "Fixed".	41
4.4	Case 3 - Confronto fra molla "Free" e "Fixed".	42
4.5	Case 4 - Confronto fra molla "Free" e "Fixed".	42
4.6	Campo di moto con molla "Fixed" - Fase singola.	47
4.7	Campo di moto con molla "Fixed" - Fase 1/2.	48
4.8	Campo di moto con molla "Fixed" - Fase 2/2.	49
4.9	Campo di moto con molla "Fixed" - Fase 1/4.	50
4.10	Campo di moto con molla "Fixed" - Fase 2/4.	51
4.11	Campo di moto con molla "Fixed" - Fase 3/4.	52
4.12	Campo di moto con molla "Fixed" - Fase 4/4.	53
4.13	Campo di moto con molla "Fixed" - Fase 1/8.	54
4.14	Campo di moto con molla "Fixed" - Fase 2/8.	55
4.15	Campo di moto con molla "Fixed" - Fase 3/8.	56
4.16	Campo di moto con molla "Fixed" - Fase 4/8.	57
4.17	Campo di moto con molla "Fixed" - Fase 5/8.	58
4.18	Campo di moto con molla "Fixed" - Fase 6/8.	59
4.19	Campo di moto con molla "Fixed" - Fase 7/8.	60
4.20	Campo di moto con molla "Fixed" - Fase 8/8.	61
4.21	Campo di moto con molla "Free" - Fase singola.	63
4.22	Campo di moto con molla "Free" - Fase 1/2.	64
4.23	Campo di moto con molla "Free" - Fase 2/2.	65
4.24	Campo di moto con molla "Free" - Fase 1/4.	66
4.25	Campo di moto con molla "Free" - Fase 2/4.	67
4.26	Campo di moto con molla "Free" - Fase 3/4.	68
4.27	Campo di moto con molla "Free" - Fase 4/4.	69
4.28	Campo di moto con molla "Free" - Fase 1/8.	70
4.29	Campo di moto con molla "Free" - Fase 2/8.	71
4.30	Campo di moto con molla "Free" - Fase 3/8.	72
4.31	Campo di moto con molla "Free" - Fase 4/8.	73
4.32	Campo di moto con molla "Free" - Fase 5/8.	74
4.33	Campo di moto con molla "Free" - Fase 6/8.	75
4.34	Campo di moto con molla "Free" - Fase 7/8.	76
4.35	Campo di moto con molla "Free" - Fase 8/8.	77

Elenco delle tabelle

2.1	Misure sperimentali del pipe-crawler.	26
4.1	Matrice di prova per le prove di coppia.	39
4.2	Nomenclatura configurazioni di prova.	40
4.3	Velocità campo di moto con molla “Fixed” - Fase 1/1.	47
4.4	Velocità campo di moto con molla “Fixed” - Fase 1/2.	48
4.5	Velocità campo di moto con molla “Fixed” - Fase 2/2.	49
4.6	Velocità campo di moto con molla “Fixed” - Fase 1/4.	50
4.7	Velocità campo di moto con molla “Fixed” - Fase 2/4.	51
4.8	Velocità campo di moto con molla “Fixed” - Fase 3/4.	52
4.9	Velocità campo di moto con molla “Fixed” - Fase 4/4.	53
4.10	Velocità campo di moto con molla “Fixed” - Fase 1/8.	54
4.11	Velocità campo di moto con molla “Fixed” - Fase 2/8.	55
4.12	Velocità campo di moto con molla “Fixed” - Fase 3/8.	56
4.13	Velocità campo di moto con molla “Fixed” - Fase 4/8.	57
4.14	Velocità campo di moto con molla “Fixed” - Fase 5/8.	58
4.15	Velocità campo di moto con molla “Fixed” - Fase 6/8.	59
4.16	Velocità campo di moto con molla “Fixed” - Fase 7/8.	60
4.17	Velocità campo di moto con molla “Fixed” - Fase 8/8.	61
4.18	Velocità campo di moto con molla “Free” - Fase 1/1.	63
4.19	Velocità campo di moto con molla “Free” - Fase 1/2.	64
4.20	Velocità campo di moto con molla “Free” - Fase 2/2.	65
4.21	Velocità campo di moto con molla “Free” - Fase 1/4.	66
4.22	Velocità campo di moto con molla “Free” - Fase 2/4.	67
4.23	Velocità campo di moto con molla “Free” - Fase 3/4.	68
4.24	Velocità campo di moto con molla “Free” - Fase 4/4.	69
4.25	Velocità campo di moto con molla “Free” - Fase 1/8.	70
4.26	Velocità campo di moto con molla “Free” - Fase 2/8.	71
4.27	Velocità campo di moto con molla “Free” - Fase 3/8.	72
4.28	Velocità campo di moto con molla “Free” - Fase 4/8.	73
4.29	Velocità campo di moto con molla “Free” - Fase 5/8.	74
4.30	Velocità campo di moto con molla “Free” - Fase 6/8.	75
4.31	Velocità campo di moto con molla “Free” - Fase 7/8.	76
4.32	Velocità campo di moto con molla “Free” - Fase 8/8.	77

Capitolo 1

Introduzione

1.1 Il mixing

Nel mondo moderno sono molteplici i processi che richiedono un miscelamento di diverse sostanze. Ad esempio il mixing di due o più fluidi differenti è un passo cruciale nei processi farmaceutici, alimentari, polimerici, biotecnologici, cosmetici, solo per citarne alcuni [6, 8]. L'importanza di un miscelamento di alta qualità ed efficienza è ormai massima, a causa delle pressanti richieste delle industrie del campo [6, 7].

Infatti la qualità del mixing ha un peso enorme sulla qualità del prodotto finale [9]. Un miscelamento inefficiente invece può condurre ad un'insufficiente omogenizzazione, ad una bassa qualità del prodotto e ad una presenza non trascurabile di scarti [6]. Inoltre la selettività delle reazioni chimiche dipende ampiamente dal livello di mixing, dalle scale più grandi, fino alle scale molecolari [8].

Un buon miscelamento può accelerare e rendere più efficienti processi nei campi più disparati, industriali e non, in cui vengono utilizzati mixer più o meno grandi, più o meno potenti [11].

Si pensi per esempio all'industria alimentare (per esempio produzione di maionese o altre salse, figure 1.1 e 1.2), piuttosto che alla produzione di vernici (figura 1.3) e colle [3]; o ancora alla produzione di birra; o nell'edilizia, per mescolare la calce. Non ultimi i macchinari medicali, come ad esempio le centrifughe per ossigenare il sangue nelle macchine di circolazione extra-corporea (figura 1.4).



Figura 1.1: Mixer per industria alimentare.



Figura 1.2: Altro esempio di mixer per industria alimentare.



Figura 1.3: Miscelatore per vernici.



Figura 1.4: Parte della macchina per circolazione extra-corporea (CEC) adibita all'ossigenazione e debollaggio del sangue.



Figura 1.5: Mixer da cucina.

Inoltre chi non ha mai visto o utilizzato un frullatore in cucina (figura 1.5). Infine vasto è anche il campo di applicazione dei micromixer, utili per operazioni di omogenizzazione e per facilitare reazioni chimiche, dispersioni ed emulsioni [4]. L'efficienza del miscelamento in questi apparecchi è molto importante per la performance del processo. Infatti il mixing ha ripercussioni su parametri dei processi quali ratei di trasferimento di calore e massa, nonché su tempi, costi e sicurezza dei procedimenti [4]. Su scala industriale si possono velocemente intuire i vantaggi economici derivanti dall'uso di un mixer più efficiente: infatti l'energia e la potenza necessarie per ottenere un buon risultato (quindi le dimensioni dei macchinari) possono essere veramente grandi.

Inoltre ci possono essere applicazioni che richiedono particolari vincoli operativi, ad esempio le centrifughe per l'ossigenazione del sangue, che devono limitare al minimo gli sforzi tangenziali per evitare l'emolisi per attrito [5].

Per oggetti d'uso domestico invece possono non essere lampanti i vantaggi derivanti da un'ottimizzazione.

Per capirlo bisogna pensare alla produzione su larghissima scala, in cui anche un risparmio minimo sui pezzi di costruzione può portare ad un costo decisamente inferiore dell'oggetto sul grande mercato.

Si capisce quindi l'importanza che può avere la ricerca in questo campo. Trovare una configurazione ottimale per il mescolamento, che massimizzi l'efficienza può portare a due strade per ridurre i costi: la più diretta è ovviamente un minor consumo di energia per ottenere il risultato prefissato; la seconda porta invece alla possibilità di utilizzare minore potenza, riuscendo quindi a contenere le dimensioni delle apparecchiature, con una riduzione del costo di produzione (frullatori domestici, ma non solo).

Il trend globale nelle industrie chimiche e manifatturiere è infatti l'aumentare l'efficienza energetica, ridurre l'impatto ambientale e riuscire ad utilizzare impianti e macchinari più piccoli, sicuri e multifunzionali.

Si pensi che, per esempio, è stimato che in un impianto chimico tipico ogni anno vengono sprecati tra i 5 e i 45 milioni di Euro a causa di inefficienze [11]. Da qui l'importanza capitale di caratterizzare il mescolamento, in primo luogo stabilendo delle unità di misura, degli indici di prestazione, che rappresentino il concetto intuitivo di "buon mixing", e in secondo luogo trovando un collegamento tra queste misure e la fluidodinamica del processo.

1.2 Scopo del lavoro

Il presente lavoro si propone quindi come studio preliminare di un dispositivo innovativo per il mixing.

Per fare ciò è stata eseguita una serie di operazioni che ci portassero ad avere un set-up sperimentale adatto per compiere le misurazioni del caso:

- Studio della configurazione ottimale per il set-up sperimentale e degli esperimenti e misure da effettuare.
- Disegno 3D del set-up sperimentale.
- Costruzione e assemblaggio dei componenti.
- Misurazioni sperimentali.
- Post-processing dei dati acquisiti.
- Analisi e commento dei risultati ottenuti.
- Suggerimenti per continuare e completare il lavoro fatto.

Lo studio è stato, come da titolo, preliminare, nel senso che ci si è preoccupati di caratterizzare il processo a livello macroscopico solo per quanto riguarda la coppia necessaria al mescolamento. È stato inoltre effettuato uno studio del campo di moto non approfondito, ma comunque in maniera tale da trovare indizi di un possibile miglioramento nel mixing. La conferma di ciò si avrà solo però nel momento in cui verrà effettuata una quantificazione del mescolamento, operazione che esula dal presente lavoro per motivi di difficoltà sperimentale, precisione delle misure, tempi e costi.

Capitolo 2

Un dispositivo innovativo

Lo spunto decisivo per il lavoro è stato preso da un oggetto progettato dal Professor Yuli Surpin, dell'Università del Negev [1].

L'apparecchio in questione, costituito da un paio di molle ritorte in sensi opposti l'una dall'altra a formare una struttura a doppia elica, e da un motore elettrico, è in grado di muoversi rotolando in maniera simile ad un verme o ad un serpente attraverso un tubo.

Il dispositivo utilizzato in seguito non è altro che una molla simile a quelle dell'oggetto in questione, utilizzata come elica per mescolare.

Nonostante la differenza di utilizzo, può essere sicuramente utile e interessante vedere una breve analisi del funzionamento del macchinario, poichè potrebbe presentare comportamenti simili nei due casi pur diversi.

2.1 Stato dell'arte

Oggetti in grado di risalire all'interno di tubi vengono utilizzati in una grande varietà di differenti applicazioni in campi molto diversi fra loro, come la medicina (ad esempio gli endoscopi) e l'ingegneria civile (per esempio nelle tubazioni idriche, gasdotti, oleodotti e condotti fognari).

In questo quadro si pone il progetto di un attrezzo nuovo per il movimento attraverso i tubi. Un simile attrezzo potrebbe essere utilizzato, per esempio, per esaminare la parete interna di un tubo per trovare eventuali rotture, perdite, punti corrosi o che disturbano il flusso.

Il concetto di auto-propulsione sviluppato dal Professor Surpin fornisce risposte più semplici ed economiche ai problemi sopra citati rispetto alle attuali tecnologie disponibili, che si possono suddividere in due classi principali:

- La prima classe comprende attrezzi formati da una serie di sezioni dotate di ruote simili a quelle di un treno connesse da elementi flessibili.
Il movimento viene ottenuto tramite il contatto delle ruote con la parete interna del tubo.
Questo tipo di oggetti funziona al meglio per tubi di diametro di $0.7 - 0.04m$.
- La seconda classe comprende tutte le apparecchiature mediche che sono solitamente costruire basandosi sul principio peristaltico.

Alcuni sono costruiti come lombrichi con segmenti composti da tubi di gomma uniti da un fluido magnetico a base d'acqua.

Altri, come gli endoscopi, sono formati da elementi che hanno la possibilità di contrarsi ed espandersi, attuati in una certa sequenza in modo da fornire lo spostamento richiesto alla giusta velocità per l'ispezione.

2.2 Struttura, cinematica e dinamica del dispositivo

2.2.1 Struttura

La parte principale dell'apparecchio è composta da una molla allungata molto flessibile, dal diametro esterno di circa 50mm . Le estremità della molla sono bloccate a due piattelli fissati con delle viti ad un albero. Questa configurazione permette di variare la lunghezza (e quindi la trazione della molla) e il "twist", cioè l'angolo di quanto viene torta rispetto alla configurazione "a riposo" (figura 2.1).



Figura 2.1: Molla ritorta a doppia elica.

Una struttura del genere facilita il puro rotolamento nel momento in cui l'apparecchio è costretto a muoversi lungo una superficie cilindrica, ma questo moto di rotolamento è ottenuto senza l'ausilio di ruote, palline o cuscinetti.

Il meccanismo proposto causa il cosiddetto *side-winding locomotion mode*. Gli sforzi nella spirale creano una seconda spirale che preserva un equilibrio indifferente.

2.2.2 Cinematica

La spirale secondaria è caratterizzata da un *pitch* λ e da un diametro esterno D ; entrambi dipendono dallo *stretch* l e dal *twisting angle* Ψ , creando in questo modo onde spaziali. Una volta posto all'interno di un tubo con un diametro interno $D_i < D$ l'apparecchio è supportato dai picchi delle creste, come si vede in figura 2.2.

La molla ad elica (figura 2.3) manifesta uno stato di puro rotolamento se vi è applicata una forza assiale (ad esempio la gravitazione in un tubo inclinato). In questo caso, lo stato

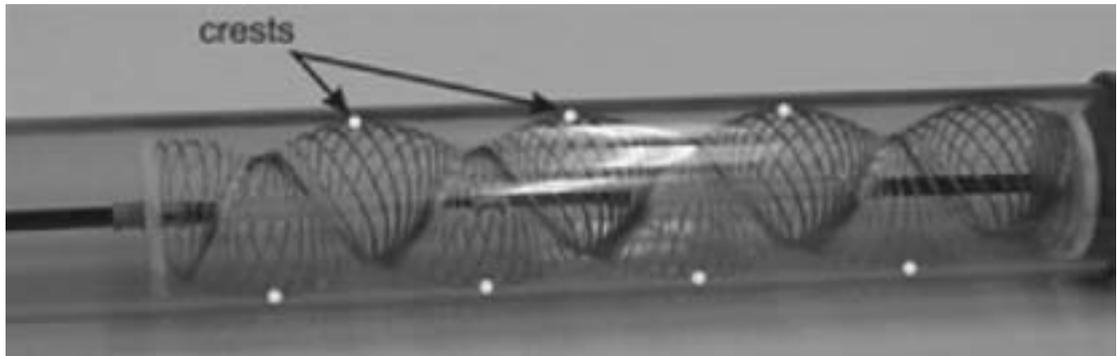


Figura 2.2: PREP (Pure Rolling Elastic Propelling) inserito in un tubo.

di equilibrio indifferente causa il movimento della molla lungo il tubo; i punti esterni si muovono lungo una traiettoria elicoidale.

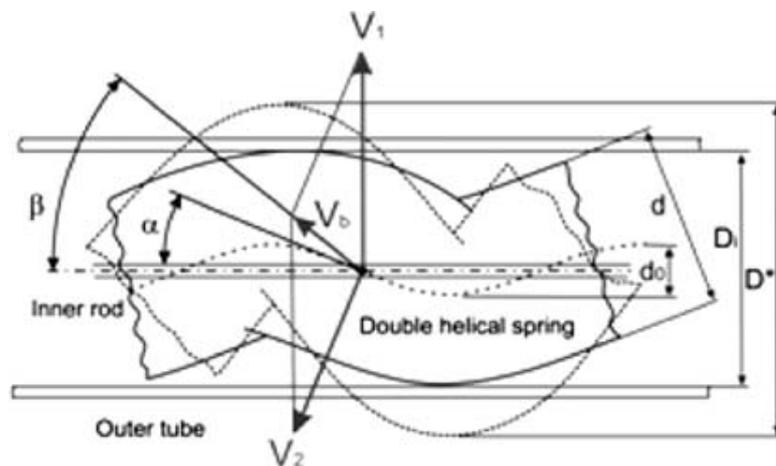


Figura 2.3: Geometria della molla a doppia elica di figura 2.1 inserita nel tubo, come in figura 2.2.

La tangente a questa traiettoria è inclinata di un angolo β nei confronti dell'asse del tubo, e la sua dipendenza rispetto all'angolo α e ai diametri D_i e d (figura 2.4) è data da:

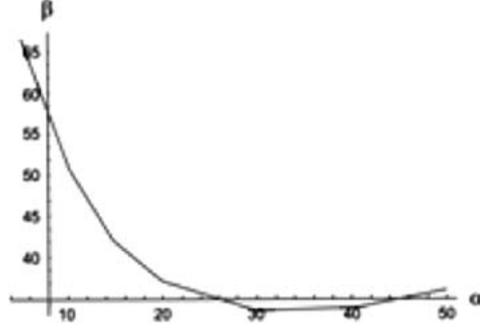


Figura 2.4: $\beta(\alpha)$ con $D_i = 60mm$, $d = 50mm$.

$$\tan\beta = \frac{D_i - d\cos\alpha}{d\sin\alpha} \quad (2.1)$$

Nel piano tangente al cilindro esistono due spostamenti e due velocità, S_x, V_x, S_y, V_y . Introduciamo adesso la *bionic rolling speed*, V_b e il *bionic diameter* D_b . I tre diametri, D_b, D_i e d formano un triangolo, localizzato in un altro piano. Se ω è la velocità angolare, tramite i triangoli di velocità si può scrivere:

$$V_b = 0.5\omega D_b = 0.5\omega \sqrt{D_i^2 + d^2 - 2D_id\cos\alpha} \quad (2.2)$$

L'angolo α , che definisce l'inclinazione delle spire, si può trovare in questo modo:

$$\tan\alpha = \frac{\pi(D_i - d)}{\lambda} \quad (2.3)$$

Per quanto riguarda l'angolo β con cui è inclinato il vettore *bionic speed*:

$$\cos\beta = \frac{d\sin\alpha}{D_b} \quad (2.4)$$

Le definizioni precedenti devono valere sia nel caso in cui l'apparecchio è immobile mentre il tubo si muove, sia nel caso in cui il tubo è immobile e l'apparecchio si muove al suo interno.

Si noti il caso in cui $\alpha = \beta$, nel quale il moto della molla viene vincolato ad un percorso particolare simile al moto di un serpente.

Il *pitch* della molla a doppia elica è dato da:

$$\tan\alpha = \frac{\pi(D_i - d)}{\lambda} \quad (2.5)$$

$$\lambda = \frac{\pi(D_i - d)}{\tan\alpha} = \frac{\pi(D_i - d)}{\tan\beta} \quad (2.6)$$

2.2.3 Dinamica

Uno schema semplificato delle forze che causano il movimento di un apparecchio di massa M all'interno di un tubo inclinato è mostrato in figura 2.5.

Si possono ora scrivere le necessarie equazioni dell'energia e l'uguaglianza tra l'energia potenziale iniziale Π dell'apparecchio ($mgS\sin\gamma$) e la somma dell'energia cinetica T_E e

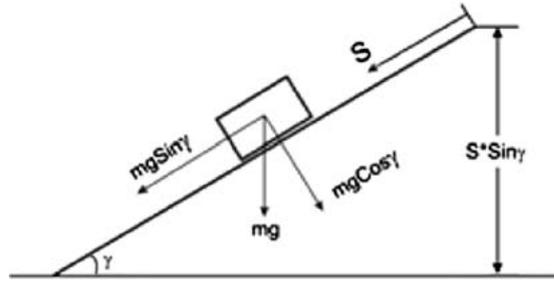


Figura 2.5: Schema delle forze che causano il movimento dell'apparecchio all'interno di un tubo inclinato.

del lavoro W compiuto dall'apparecchio contro l'attrito, descritto dal coefficiente d'attrito dinamico μ .

Il primo termine rappresenta l'energia cinetica dovuta al movimento della molla lungo il tubo, mentre il secondo rappresenta l'energia cinetica sviluppata dalla rotazione della molla nel tubo.

In realtà due spire della molla sono posizionate in maniera random, e collegate meccanicamente da una rigidità che sviluppa forze resistenti in direzioni differenti (x , y , z) rappresentabili tramite dei coefficienti di rigidità costanti: c_X , c_Y , c_Z , c_x , c_y , c_z , c_l . Le forze e le coppie resistenti sono create dalla forza di gravità e dagli attriti statici e dinamici, i secondi calcolabili solo per via sperimentale.

Avere a che fare con equazioni differenziali random che descrivono il moto di sei gradi di libertà per ogni spira della molla è troppo oneroso ai fini ingegneristici.

Le molle possono essere descritte in un sistema di coordinate tridimensionale in cui l'apparecchio è posizionato lungo l'asse z mentre gli assi x e y definiscono la sezione trasversale di ogni spira della molla. Ogni molla consiste dunque di n spire, ognuna inclinata in maniera random rispetto all'asse z di un angolo α e avente massa dm e momento d'inerzia dJ . In pratica un simile sistema meccanico possiede infiniti gradi di libertà e per trattarlo bisogna:

- Scrivere le equazioni di ogni spira della molla, considerando la sua posizione istantanea.
- Definire tutti i coefficienti di rigidità della molla in ogni direzione.
- Definire i coefficienti d'attrito dinamico e statico.

2.2.4 Modalità d'utilizzo inversa

Nella configurazione descritta in precedenza l'apparecchio si muove come illustrato in figura 2.3, in maniera simile ad una vite con *pitch* λ , rotolando sul diametro D_b e muovendosi lungo il tubo con velocità $V = V_b \cos \beta$, proiezione sull'asse orizzontale.

A causa della forza d'attrito di rotolamento, l'energia W che serve per guidare l'apparecchio è abbastanza piccola a confronto di quella necessaria per un puro scivolamento.

La figura 2.6 mostra l'inversa modalità d'utilizzo in cui la molla è avvolta attorno ad un cilindro interno con diametro d_i e, in maniera analoga, la molla si muove lungo il cilindro come un bullone su una vite, o viceversa. La formula che descrive il comportamento dell'apparecchio in questo caso è $F = \mu_{roll} N$. La velocità rotazionale, analoga a V_b ,

tangenziale al cilindro interno è dovuta all'applicazione della forza assiale F sulla struttura esterna o sul cilindro interno e si può calcolare in maniera analoga al caso precedente.

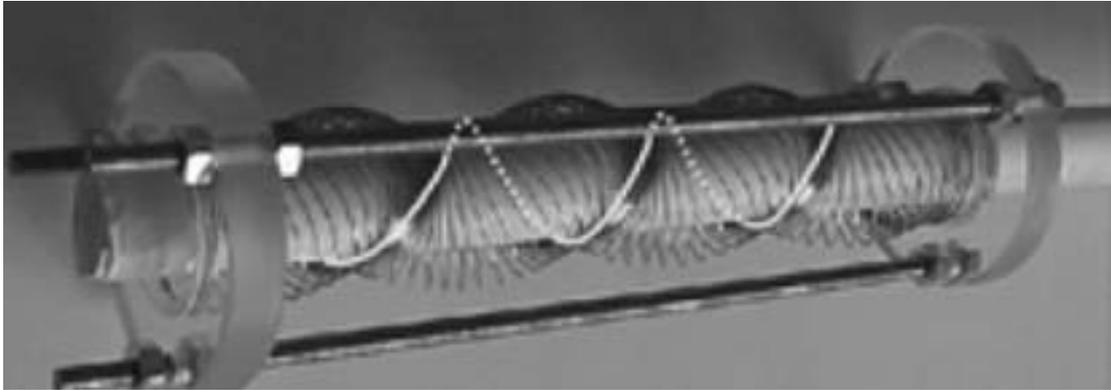


Figura 2.6: Struttura inversa dell'apparecchio.

2.3 Rilevazioni sperimentali

2.3.1 Il dispositivo auto-movente

Da ciò che è stato detto prima si può concludere che una forza assiale agente lungo il tubo porta l'apparecchio a ruotare come una vite rispetto al tubo stesso e viceversa. Questa rotazione inoltre causa il movimento longitudinale della molla lungo l'asse del tubo. In figura 2.7 è mostrato un possibile design dell'oggetto descritto: un motore a corrente continua è connesso a due molle ritorte a doppia elica, una in senso opposto all'altra.

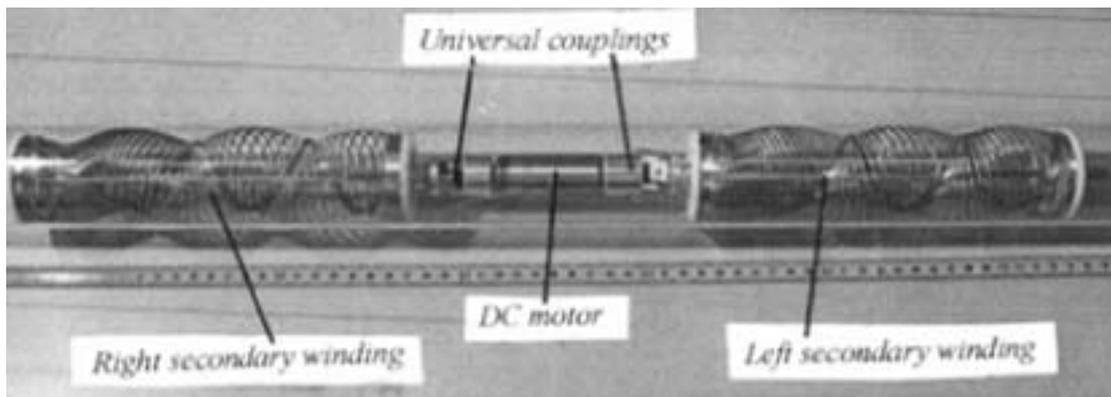


Figura 2.7: Pipe-crawler.

Il pipe-crawler proposto in figura 2.7 ha una lunghezza di 600mm , mentre il tubo che deve attraversare è lungo 1400mm . Il motore permette il movimento in entrambi i versi a seconda del verso di rotazione.

Sono state fatte alcune ipotesi per la descrizione della dinamica dell'apparecchio. Si consideri ogni spira della molla separatamente: la massa della singola spira m si può esprimere in rapporto alla massa totale $m = \frac{M}{n}$, dove n è il numero delle spire. Nel nostro caso il numero di avvolgimenti è $n = 95$ e la massa è $M = 120g$, quindi $m \approx 1.25g$. Si può inoltre notare un altro fenomeno dinamico: la presenza di vibrazioni auto-eccitate dovuta dalla differenza fra l'attrito statico R_1 e dinamico R_2 . In figura 2.8 si può notare la dipendenza semplificata della forza d'attrito dalla velocità:

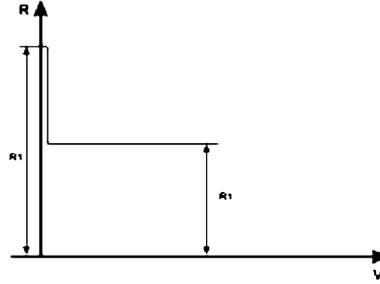


Figura 2.8: Dipendenza dell'attrito dalla velocità.

In realtà il movimento dell'apparecchio presenta il ben noto carattere "slip-stop" presente in dinamica non lineare.

Si può quindi approssimare il movimento dell'oggetto come in figura 2.9.



Figura 2.9: Modello semplificato del pipe-crawler.

Il modello consiste di una massa (1), agganciata ad un cilindro (3), tramite una molla (2). Il suo comportamento dipende dalla posizione del cilindro al tempo $t = 0$ e da R_2 . Al tempo $t = 0$, la forza di trazione P dipende da R_2 tramite la massa e la superficie. Poi, la massa e il cilindro si muovono con la stessa velocità V_0 . Quando la massa si ferma (al tempo $t = t_1$), il cilindro muovendosi verso destra comprime la molla con una forza che dipende dal coefficiente di attrito statico R_1 e, per definire la risposta dinamica del meccanismo, bisogna conoscere il valore di c_l , la rigidità lineare delle molle per calcolare la frequenza p delle oscillazioni auto-eccitate, che si ottiene con la seguente espressione:

$$p^2 = \frac{c_l}{m} \quad (2.7)$$

Il movimento della molla inizia quando il valore della forza P raggiunge il valore di attrito statico R_1 . Si prenda questo istante come $t = 0$. Si supponga che la forza stazionaria P , che sviluppa oscillazioni auto-eccitate random possa essere descritta approssimativamente in questa forma:

$$P = c_l(z - Vt) \quad (2.8)$$

dove z è la deformazione della molla, V la velocità delle oscillazioni, t il tempo. La frequenza delle oscillazioni auto-eccitate è data dall'equazione 2.7. L'equazione del moto della massa è invece:

$$\ddot{z} + p^2 z = p^2 V t + \frac{R_1 - R_2}{m} \quad (2.9)$$

Dall'equazione 2.9 si può notare come, quanto più grande è il valore di m , tanto più piccola è l'influenza dell'attrito non lineare $R_1 - R_2$ se gli altri parametri rimangono gli stessi.

Le condizioni iniziali per risolvere questa equazione sono:

$$z = 0, \dot{z} = 0$$

La soluzione dell'equazione 2.9 diventa quindi:

$$z = V t - \frac{V}{p} \sin(pt) + \frac{R_1 - R_2}{c_l} (1 - \cos(pt)) \quad (2.10)$$

Per calcolare la velocità della molla basta derivare l'equazione 2.10. La molla si ferma al tempo in cui si ottiene di nuovo $V = 0$, oppure quando:

$$V - V \cos(pt_1) + \frac{p(R_1 - R_2)}{c_l} \sin(pt_1) = 0 \quad (2.11)$$

Chiamando:

$$A = \frac{p(R_1 - R_2)}{c_l V} \quad (2.12)$$

la condizione in cui la molla si ferma durante le oscillazioni auto-eccitate diventa:

$$A \sin(pt_1) = \cos(pt_1) - 1 \quad (2.13)$$

Sostituendo $p \approx 4.7 \text{ rad/s}$ nell'equazione 2.13, si può calcolare $t_1(A)$; in figura 2.10 è riportato quanto ottenuto:

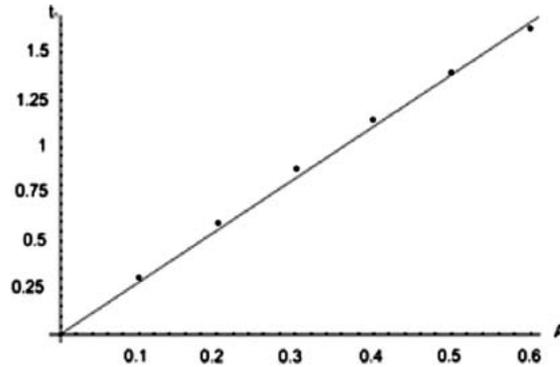


Figura 2.10: Dipendenza $t_1(A)$ calcolata a partire dall'equazione 2.10.

Si può quindi proporre un metodo per calcolare la seconda componente di tempo t_2 , che mostra il tempo di fermata della molla, a partire dal fatto che il periodo delle oscillazioni è $T = t_1 + t_2$:

$$t_2 = \frac{\Delta l}{V} = \frac{2(R_1 - R_2)}{c_l V} = \frac{2A}{p} \quad (2.14)$$

$$T = t_1 + t_2 \quad (2.15)$$

Assumendo $t_1 \approx 1.25s$, da figura 2.10 si ricava $A \approx 0.45$; quindi dalle equazioni 2.14 e 2.15 si ottiene $t_2 \approx 0.19s$ e $T \approx 1.44$.

Bisogna ora combinare i dati sperimentali stimando i risultati statisticamente. Osservando l'apparecchio dal vivo e con filmati si sono ottenuti i seguenti risultati:

$$t_{1av} \approx 1.5s, t_{2av} \approx 2.3s, T_{tot} \approx 17.3s, z_{av} = 6.1cm$$

La velocità media dell'apparecchio misurata, è risultata:

$$V_{1av} \approx 4.6cm/s$$

In $17.6s$, il tempo necessario all'apparecchio per muoversi lungo $80cm$ di tubo, la molla fa un numero di "salti" pari a circa:

$$j \approx \frac{T_{tot}}{t_{1av}} \approx 12$$

La distribuzione degli spostamenti random della molla è caratterizzata da valori di media e valore RMS pari a:

$$\sigma_t \approx 0.2112s, \sigma_x \approx 1.046cm$$

La frequenza naturale risulta:

$$p = \frac{2\pi}{T} \approx 4.7[1/s]$$

La rigidità assiale c_l della molla è stata calcolata tramite l'equazione 2.7:

$$c_l = \frac{p^2}{m} \approx 5N/m$$

La differenza tra i coefficienti d'attrito R_1 e R_2 deriva dalle equazioni precedenti:

$$\frac{R_1 - R_2}{c_l} = \frac{V_{av} t_{2av}}{2} \approx 0.11m$$

$$R_1 - R_2 \approx 0.55N$$

È facile vedere che lo spostamento della molla nel tubo e il numero di passi o "salti" in cui questo spostamento avviene hanno componenti random. L'apparecchio è messo in moto tramite un motore elettrico a corrente continua con circa $3W$ di potenza e $\omega = 3.8rad/s$. Si muove linearmente a circa $V = 0.050m/s$ (risultato sperimentale).

Per $D = 0.1m$, $d = 0.05m$, $\omega = 3.8rad/s$ e $\alpha = 30^\circ$, dall'equazione 2.2 si ottiene $V_b = 0.095m/s$.

Una visione qualitativa di spostamento e velocità è fornita dalla figura 2.11.

Si ricorda che i valori della forza d'attrito, così come la posizione reale delle spire della molla sono, in un certo senso, random.

I valori di T , t_1 , t_2 , p , V sono calcolabili solo su base statistica a partire dalle misurazioni effettuate, come si può vedere ad esempio in tabella 2.1, e fluttuano attorno a valori medi.

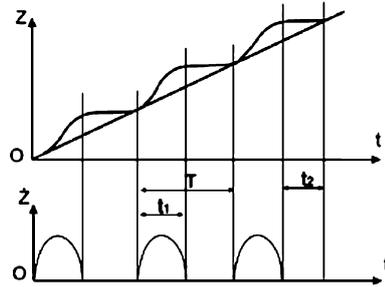


Figura 2.11: Spostamento e velocità del dispositivo.

Parameter units	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$z(cm)$	6.9	6.5	5.9	5.5	5.3	7.0	7.0	6.0	6.0	4.1	7.7	5.5
$t_1(s)$	1.45	1.50	1.22	1.00	1.27	1.41	1.55	1.25	1.49	1.21	1.38	1.38

Tabella 2.1: Misure sperimentali del pipe-crawler.

2.3.2 Un altro pipe-crawler

È stata realizzata una versione particolare del dispositivo, in grado di venire incontro alle specifiche di una particolare industria. Il risultato ottenuto si può vedere in figura 2.12 e una vista d'insieme dell'apparecchio dentro il tubo in figura 2.13.



Figura 2.12: Pipe-crawler alternativo.

In questo caso, il diametro esterno D del dispositivo è intorno ai $125mm$, e l'apparecchio è stato equipaggiato con molle adatte al movimento interno ad un tubo di plastica flessibile per dimostrare la sua capacità di seguire curvature nel piano orizzontale (in questo caso circa $150cm$ di raggio) e in parte nel piano verticale (con un angolo di circa 8°). Altri dati misurati e calcolati sono stati:

$$t_{12av} \approx 2.56s, t_{22av} \approx 1.2s, T_2 \approx 3.76s, T_{tot} \approx 86s$$

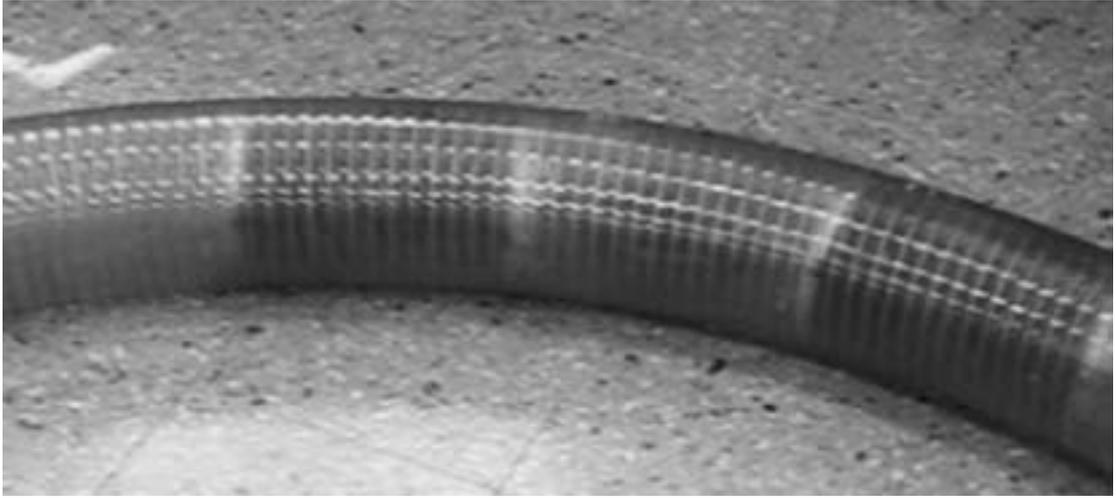


Figura 2.13: Vista d'insieme del dispositivo alternativo inserito nel tubo.

In 86s, il tempo necessario al dispositivo per muoversi lungo la lunghezza del tubo $L_2 = 10m$, l'apparecchio compie un numero di "salti" pari a circa:

$$j \approx \frac{T_{tot}}{t_{12av}} \approx 33$$

La velocità media di questo oggetto può essere calcolata come:

$$V_{2av} = \frac{L_2}{T_{tot}} \approx 0.1163$$

o come:

$$V_{2av} = \frac{L_2 j}{t_{12}} \approx 0.1184$$

I due differenti modi per calcolarla danno praticamente lo stesso risultato.

La frequenza naturale è calcolata come:

$$p_2 = \frac{2\pi}{T_2} \approx 1.67[1/s]$$

e la rigidità della molla:

$$k = p_2^2 m$$

La differenza tra i coefficienti d'attrito:

$$\frac{R_1 - R_2}{k} = \frac{V_{2av} t_{22av}}{2} \approx 0.07m$$

$$R_1 - R_2 \approx 1.05N$$

Va qui ricordato, ancora una volta, come nel caso precedente, che i valori d'attrito e della reale posizione della molla sono in un certo modo random e possono quindi essere

calcolati solo dopo aver ottenuto certi parametri statistici.

T_2 , t_{12} , t_{22} , p_2 fluttuano attorno a valori medi. Tutti i calcoli sono stati effettuati, come nel precedente esempio combinando risultati ottenuti sperimentalmente con definizioni analitiche.

Dal momento che in questo secondo caso i materiali utilizzati sono differenti rispetto a quelli del dispositivo originale e la superficie interna del tubo è zigrinata, i calcoli non andrebbero effettuati come semplice ripetizione di quelli relativi al primo esempio (conclusione a cui si giunge anche attraverso l'osservazione del dispositivo che si muove nel piano orizzontale).

2.3.3 Lavoro futuro su questo tipo di dispositivi

Ci sono un certo numero di aspetti che richiedono uno studio più approfondito:

- Andrebbe determinata, analiticamente o sperimentalmente, la forza di trazione di un apparecchio di date dimensioni che si muove all'interno di un tubo di diametro ed inclinazione fissati.
- Andrebbero trovate eventuali condizioni che facilitino il movimento dell'apparecchio lungo un tubo ricurvo ed una soluzione al problema dovuto al controllo dell'oggetto all'interno di un tubo con diramazioni se richiesta.
- Possono essere costruiti "treni" di questi oggetti in modo da produrre meccanismi di diametri differenti e cercare strutture più regolabili per la molla.
- Si dovrebbero elaborare mezzi per il controllo remoto di un apparecchio in grado di fornire informazioni visive o ambientali all'interno di un lungo tubo o tunnel.
- Il modello andrebbe ridisegnato e sviluppato per venire incontro ai requisiti delle possibili differenti applicazioni industriali e ingegneristiche.

Per quanto riguarda il lavoro di tesi, come vedremo, si è partiti dalla molla a doppia elica di cui si è parlato in precedenza, che è stata utilizzata all'interno di un mixer studiato e costruito appositamente per gli esperimenti svolti.

Progettazione dell'esperimento

La parte più importante della tesi è stata senza dubbio la progettazione dell'esperimento e la messa in opera del set-up sperimentale.

Infatti era cruciale riuscire a costruire una configurazione che permettesse di svolgere le misurazioni necessarie e che fosse facilmente riutilizzabile e riadattabile per esperimenti futuri.

In questo senso lo studio e la realizzazione del set-up definitivo è stata la parte più lunga del lavoro, in modo da riuscire ad ottenere una soluzione ottimale con i materiali e gli strumenti a disposizione.

3.1 Studio della configurazione di prova

Il punto di partenza della costruzione e dello studio del set-up sperimentale è stato senza dubbio la molla: infatti le dimensioni della molla erano vincolanti sia per le dimensioni del recipiente in cui andava inserita, sia per i piattelli di sostegno all'albero.

Per quanto riguarda il contenitore si è optato senza tante riserve per un cilindro in PVC trasparente, materiale che garantiva la possibilità di poter osservare il funzionamento lateralmente senza fatica. Inoltre la forma cilindrica, oltre ad una reperibilità piuttosto facile, anche con un'ampia scelta di diametri e spessori, a differenza di tubi di altre sezioni, era la stessa utilizzata negli esperimenti preliminari del Professor Surpin.

A questo punto ci si è concentrati sul motore: è stato scelto il motore elettrico SME 1153010, della *Parker Automation* (figura 3.1), in grado di garantire una variazione costante di velocità angolare di rotazione compresa tra 0 e 3000RPM. Ciò si è rivelato molto importante, in quanto ha permesso di spaziare in un ampio range di velocità durante gli esperimenti.

Il motore è alimentato elettricamente a 230 V e 10 A.

Il motore è comandato con un azionamento elettrico (figura 3.2), con all'interno un servoamplificatore SLVD10N (figura 3.3), alimentato a 230 V e 10 A, comandabile da computer tramite il software Motion Wiz.

A questo punto si è studiato il miglior modo per collegare la molla al motore:



Figura 3.1: Motore.



Figura 3.2: Azionamento elettrico.



Figura 3.3: Servoamplificatore.

- Per prima cosa sono stati disegnati i piattelli di fissaggio; come si vede da figura 3.9 i piattelli cilindrici sono progettati in modo da alloggiare comodamente la molla in un solco per impedirne spostamenti o distaccamenti. Hanno inoltre una testata in cui sono praticati due fori $M4$ a 90° per l'alloggiamento di grani di fissaggio.
- In secondo luogo è stato progettato un giunto cilindrico (figura 3.10) rigido da porre tra il mandrino in cui bloccare l'asta a cui la molla è attaccata e l'albero in uscita dal torsionometro. Anche questo pezzo è stato provvisto di sei fori $M4$.
- Poi sono state recuperate delle travi per comporre una struttura di sostegno al corpo motore con base ad H su cui saldare un'altra trave verticale, a cui fissare un tubo che facesse da spessore, per distanziare l'asse e fare spazio al cilindro d'acqua.
- Infine sono state disegnate le piastre di fissaggio.

Gli ultimi pezzi, già disponibili, utilizzati per la costruzione del macchinario sono stati:

- Un riduttore angolare con rapporto di riduzione pari a 2.56 (figura 3.4).
- Un giunto elastico a soffietto per il collegamento dell'albero motore in uscita dal riduttore con l'albero in ingresso al torsionometro (figura 3.5).
- Un mandrino da fresa in cui bloccare l'asta di acciaio rettificata a cui è stata fissata la molla (figura 3.6).
- Una barra d'acciaio rettificata di lunghezza 50cm e spessore 10mm su cui fissare la molla.



Figura 3.4: Riduttore angolare.

3.2 Scelta delle misure da effettuare

Le misure effettuate sono state di due tipi:

- Misure di coppia.
- Visualizzazioni del campo di moto.



Figura 3.5: Giunto elastico a soffietto.



Figura 3.6: Mandrino.

3.2.1 Misure di coppia

Si è scelto di partire subito dalle misure di coppia in parte per avere un confronto con le impressioni degli esperimenti preliminari fatti dal Professor Surpin che sembravano indicare una riduzione di coppia necessaria utilizzando la molla in configurazione libera, ed in parte perchè la misura di coppia è indice della potenza consumata per svolgere il lavoro di mixing.

I soli dati di coppia però sono in un certo senso un po' limitanti, in quanto senza un'informazione sull'efficienza del mescolamento danno indicazioni solo sulla potenza (e quindi l'energia) consumata.

Per le misure di coppia ci si è serviti di un torsionometro HBM T20 WN, con fondo scala di $50Nm$ (vedi figura 3.7).



Figura 3.7: Torsionometro HBM T20 WN.

La ragione della scelta di un fondo scala del genere è dovuta al montaggio non “tradizionale” del trasduttore. Infatti per la configurazione di prova il torsionometro è stato montato tra un giunto elastico ed uno rigido (invece che tra due giunti elastici a soffietto), per evitare vibrazioni eccessive alla molla, che avrebbero messo in crisi prima di tutto il macchinario e in secondo luogo l'accuratezza delle misure. Per questa ragione si è optato per uno strumento che desse anche delle garanzie sulla robustezza oltre che sull'accuratezza.

3.2.2 Visualizzazioni del campo di moto

L'altra misura è stata quella che ha creato più problemi, a causa delle condizioni di misura. Una PIV (*Particle Image Velocimetry*) vera e propria si è dimostrata di difficilissima realizzazione a causa del movimento sia della geometria interna, sia del campo di moto attorno ad essa; ciò avrebbe sicuramente creato grossi problemi nel post-processing al momento di correlare i frames, in quanto i riflessi sulle spire, muovendosi come i pallini sarebbero entrati nel processo di correlazione dando risultati assolutamente inattendibili. Anche l'utilizzo di coloranti e traccianti è stato scartato, a causa delle alte velocità di rotazione, che ne avrebbero comportato una diffusione in tempi molto piccoli, oltre alla difficoltà aggiuntiva dovuta al progetto di un dispositivo per la diffusione puntuale del

tracciante stesso.

Si è quindi optato per una tecnica abbastanza grossolana, basata sulla PTV (*Particle Tracking Velocimetry*) [2]. La PTV prevede, a differenza della PIV, di seguire (*track*) le particelle da un frame all'altro, una per una, invece che fare una correlazione statistica sull'insieme delle particelle presenti in ogni frame.

Proprio per questo motivo il *seeding* delle particelle è generalmente più basso e le particelle sono di dimensioni maggiori [2].

Nel nostro caso questa tecnica è stata modificata per venire incontro alla disponibilità di strumenti e alla sicurezza dell'esperimento. È stata infatti creata una lama di luce con un proiettore e una diapositiva modificata con delle piccole piastrine metalliche in maniera tale da evitare l'utilizzo del laser, vista la presenza abbondante di acqua e parti metalliche, e sono state usate particelle di dimensioni molto grosse, in maniera tale da renderle riconoscibili in fase di post-processing. Per questo motivo anche il *seeding* è stato molto più basso rispetto ad una PTV normale, per evitare scontri tra particelle che inficiassero i risultati ottenuti.

3.3 Disegno 3D

In questa sezione vengono riportati i disegni 3D eseguiti con SolidEdge dell'apparecchiatura assemblata e dei pezzi che sono stati prodotti:

3.3.1 Apparecchiatura completa

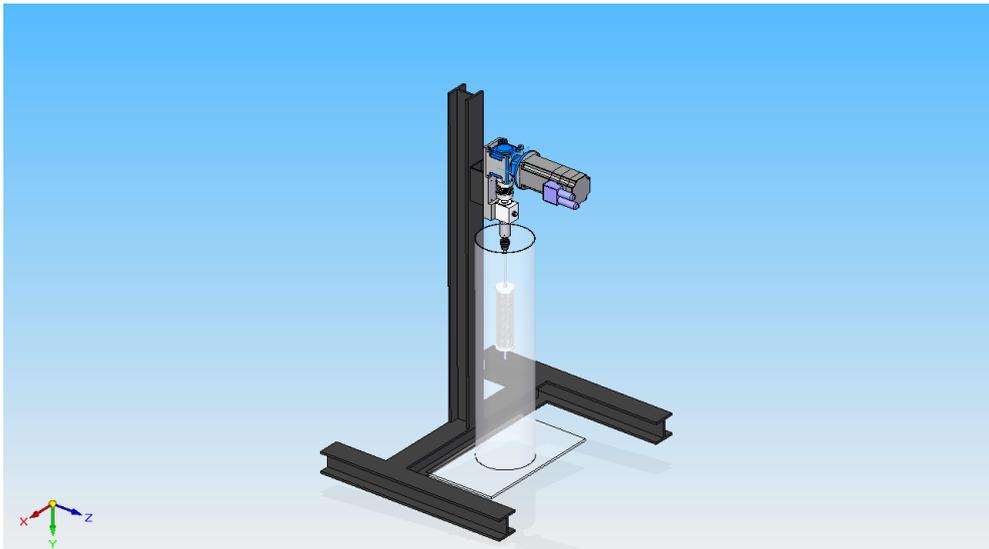


Figura 3.8: Assieme della struttura completa.

3.3.2 Piattelli

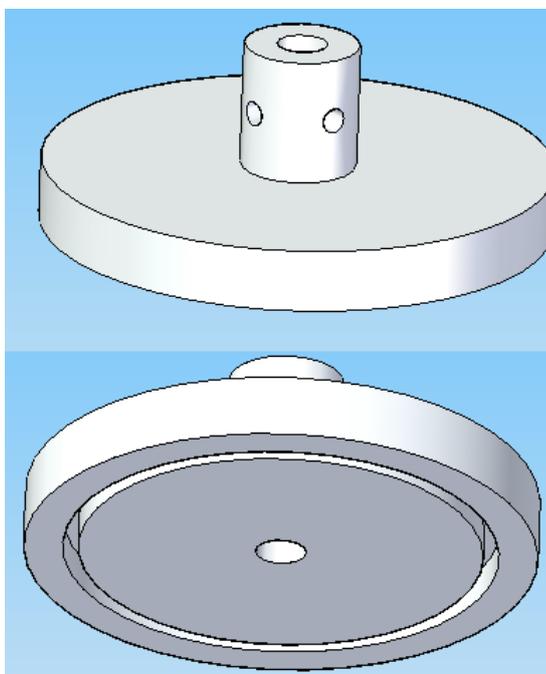


Figura 3.9: Disegno 3D del piattello di fissaggio.

3.3.3 Giunto rigido

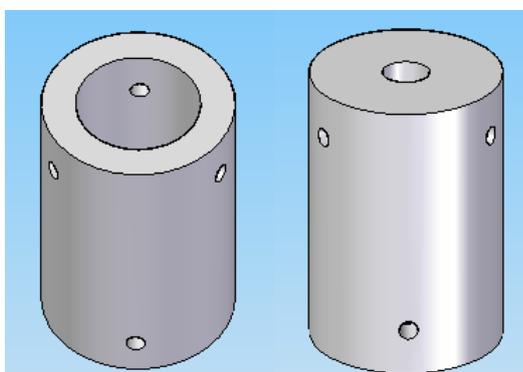


Figura 3.10: Disegno 3D del giunto rigido.

3.3.4 Piastra di fissaggio

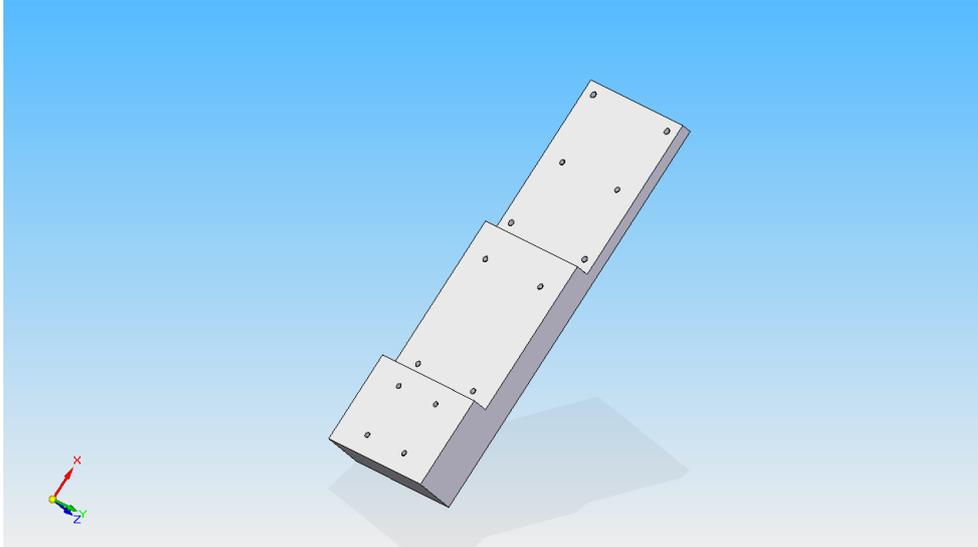


Figura 3.11: Disegno 3D della piastra di fissaggio.

3.4 Produzione e assemblaggio dei componenti

I piattelli di fissaggio sono stati realizzati in alluminio tornito dal pieno. Nel solco di alloggiamento sono state incollate le prime due/tre spire della molla con una resina epossidica bi-componente, in maniera tale da impedire il distacco della molla alle alte velocità di rotazione.

L'insieme molla/piattelli (figura 3.12) viene fissato all'asta, che funge da albero di rotazione interno, con due grani per ogni piattello; in questo modo si riesce a regolare la torsione della molla rispetto alla condizione di riposo (figura 3.13).

L'asta viene poi bloccata nel mandrino (figura 3.6), che viene a sua volta fissato al torsionometro (figura 3.7) con il giunto rigido (figura 3.10).

Il torsionometro viene poi fissato all'albero in uscita dal riduttore in maniera tradizionale con un giunto elastico a soffiato (figura 3.5).

Il tutto è avvitato alla struttura tramite una piastra di fissaggio in alluminio; la piastra è stata realizzata in due pezzi, dal pieno, per questioni di risparmio di materiale e comodità di lavorazione.

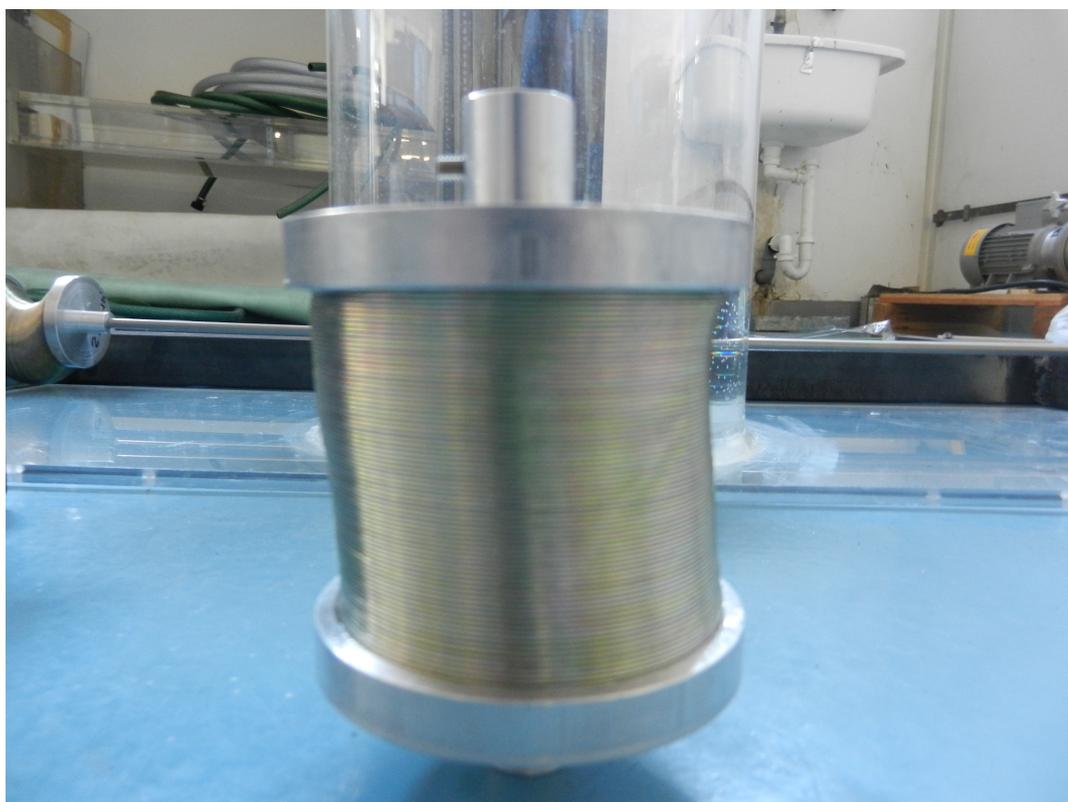


Figura 3.12: Insieme di molla e piattelli.

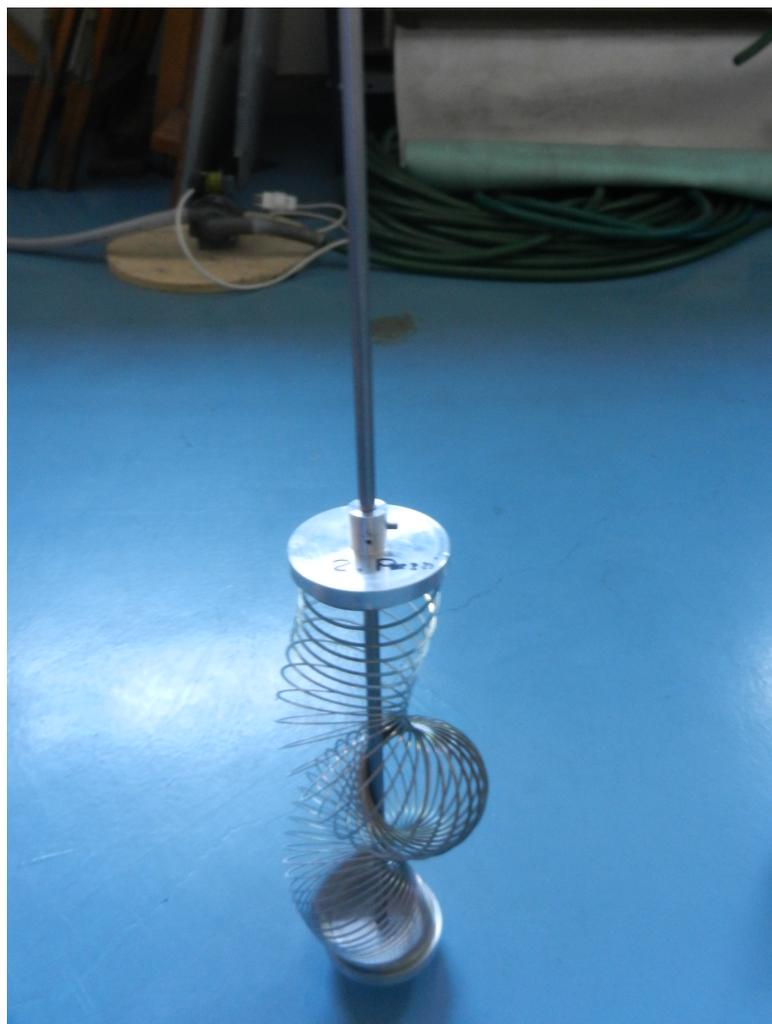


Figura 3.13: Molla ritorta fissata sull'albero.

Capitolo 4

Risultati delle prove

In questo capitolo vengono presentati i risultati ottenuti durante la campagna sperimentale e si cerca di darne una spiegazione convincente.

4.1 Misure di coppia

Per quanto riguarda le misure di coppia è stata stabilita una matrice di prova, che racchiudesse in sé tutte le casistiche da analizzare.

I parametri che si è ritenuto interessante variare sono stati essenzialmente quattro:

- Configurazione con molla libera (“Free”), ossia lasciata libera di traslare lungo l’asse, e molla bloccata (“Fixed”), ossia fissata sull’asse in modo da impedirne la traslazione in questa direzione.
- Diametro esterno del cilindro (e quindi rapporto con il diametro della molla).
- Grado di torsione della molla rispetto alla configurazione a riposo (“Twist”).
- Velocità di rotazione (ω).

Considerando che ogni parametro, a parte la velocità, è stato fatto variare tra due condizioni, in tutto si ottengono otto *test cases*, in cui analizzare i risultati al variare della velocità di rotazione ω .

Ogni configurazione è stata valutata a diciassette velocità, variabili tra $\pm 390.625 RPM$ ($\pm 1000 RPM$, prima della riduzione), dove valori negativi di ω si hanno in corrispondenza di rotazione del piattello superiore della molla concorde alla torsione della stessa e valori positivi per rotazione nel senso opposto.

In tabella 4.1 sono riportati i parametri variabili nelle prove:

Parametro	Valore 1	Valore 2
Configurazione molla	Free	Fixed
Diametro interno cilindro	234mm	130mm
Numero di giri di “twist”	1	1.5

Tabella 4.1: Matrice di prova per le prove di coppia.

4.1.1 Acquisizione dati

Per l'acquisizione dei dati ci si è serviti come già detto di un torsionometro HBM T20 WN (figura 3.7), collegato ad un sistema di acquisizione USB CompactDAQ NI cDAQ-9172 della National Instruments (figura 4.1).



Figura 4.1: Sistema di acquisizione USB NI cDAQ-9172.

Per ottenere i risultati desiderati ci si è serviti del software LabView. Per ogni velocità sono stati acquisiti tre valori di coppia misurati dal torsionometro, in modo da verificare la ripetibilità, e quindi la credibilità delle misure. I dati sono poi stati filtrati per eliminare il rumore di misura.

4.1.2 Grafici

In questa sezione vengono riportati i grafici ottenuti dalle misure di coppia. Su ogni grafico è riportato il confronto tra molla “Free” e molla “Fixed”, a parità degli altri parametri. La nomenclatura delle diverse configurazioni è riportata in tabella 4.2

Configurazione	Diametro interno cilindro	Numero giri di “twist”
Case 1	234mm	1
Case 2	234mm	1.5
Case 3	130mm	1
Case 4	130mm	1.5

Tabella 4.2: Nomenclatura configurazioni di prova.

Dai grafici 4.2 e 4.3 si può notare una netta riduzione di coppia nella configurazione di molla “Free” a partire da $|\omega| \approx 200RPM$, soprattutto in figura 4.2. Si può inoltre notare come nella seconda configurazione i valori di coppia si alzano e la differenza tra le due molle è meno netta. Ciò è spiegabile pensando che la molla “Free” con un maggior “twist” ha meno libertà di traslare lungo l’asse e quindi il suo comportamento è più vicino a quello della corrispondente molla “Fixed”. Questo comportamento si nota in parte anche nelle configurazioni di figure 4.4 e 4.5, anche se ad alte velocità i valori misurati risultano falsati dall’interferenza tra la molla e la parete interna del cilindro più stretto (il diametro della molla è di circa 65mm, che una volta ritorta crescono fino ad arrivare a circa 115, a fronte di una lunghezza di 260mm); è proprio dovuto a ciò il picco che si nota sopra i 300RPM dei valori di coppia della molla “Free”, altrimenti poco spiegabile. Un'altra annotazione che si può fare guardando i grafici delle prime due configurazioni

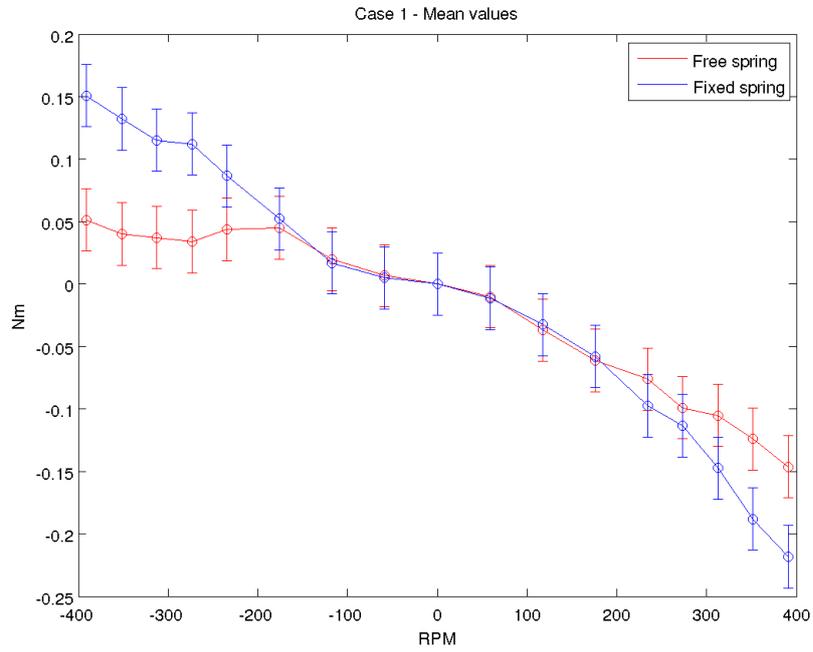


Figura 4.2: Case 1 - Confronto fra molla "Free" e "Fixed".

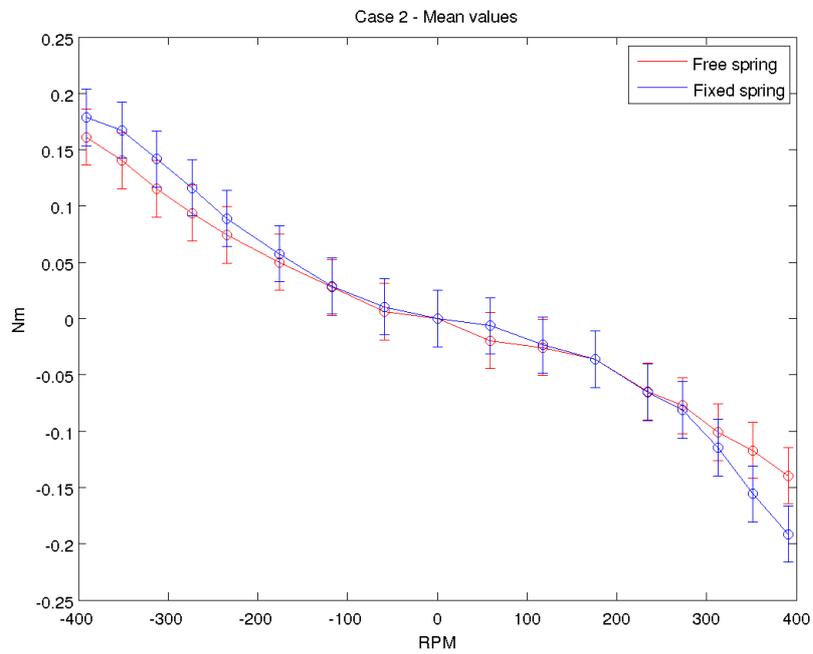


Figura 4.3: Case 2 - Confronto fra molla "Free" e "Fixed".

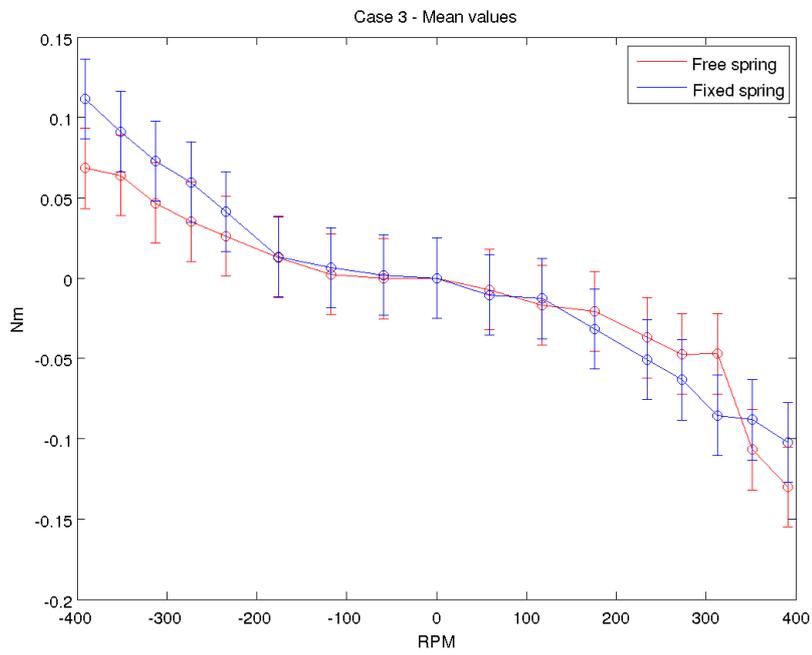


Figura 4.4: Case 3 - Confronto fra molla “Free” e “Fixed”.

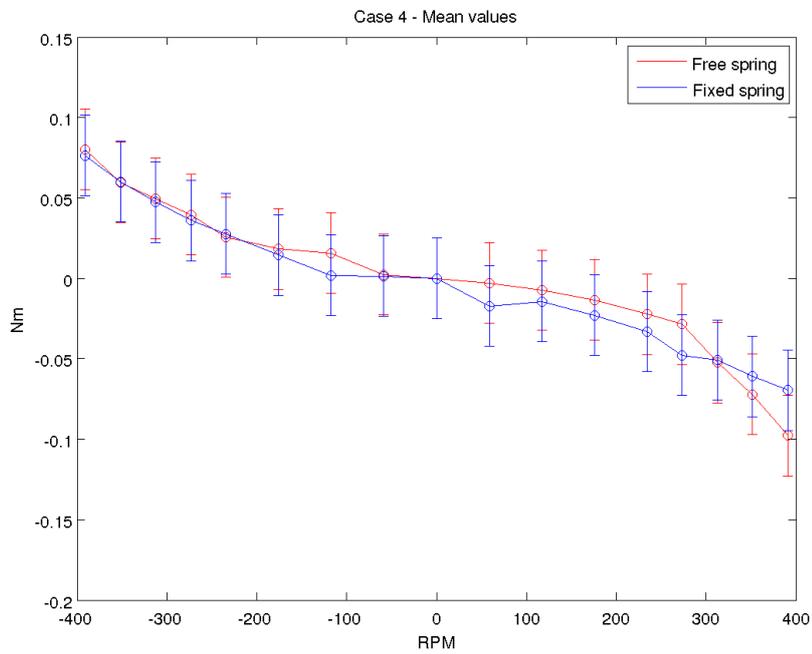


Figura 4.5: Case 4 - Confronto fra molla “Free” e “Fixed”.

(figure 4.2 e 4.3) è la tendenza a sviluppare valori di coppia leggermente maggiori per ω positive, e nella configurazione 1, nel caso di molla “Free”, risultano addirittura molto maggiori i valori di coppia per ω positive rispetto ai valori ottenuti alle velocità di rotazione opposte.

Questa tendenza sembra addirittura invertirsi nelle misure con cilindro più piccolo (figure 4.4 e 4.5), ma ancora una volta i valori per $|\omega|$ elevato non sono completamente attendibili per problemi di interferenza molla - parete.

Un’ultima cosa che si può rilevare dai grafici è l’andamento simile, ad “S”, dei valori di coppia in funzione delle velocità angolari riscontrabile in tutte le configurazioni analizzate. I grafici sono riportati con le barre di incertezza. L’errore massimo, in verità situazione molto pessimistica, è pari a meno dello 0.1% del fondo scala. C’è però da notare che la ripetibilità delle misure ha mostrato un’attendibilità dei valori calcolati ben superiore a quella dichiarata dal costruttore, che tiene in conto di tutti i possibili fattori di disturbo pessimi.

4.2 Visualizzazioni del campo di moto

Le visualizzazioni del campo di moto si sono limitate al piano verticale passante per l’asse del cilindro, in quanto visualizzazioni tridimensionali presentavano problematiche di acquisizione e processing dei dati considerevoli.

Anche le visualizzazioni in un piano orizzontale, parallelo al fondo del cilindro presentavano problemi di acquisizione: infatti volendo filmare da sotto il fondo del cilindro si presentava sia il disturbo dovuto alla quantità d’acqua presente tra il fondo e la molla, sia il problema di alzare un’apparecchiatura così pesante senza che le siliconature cedessero; volendo invece posizionare la telecamera sopra il pelo libero dell’acqua si poneva il problema dovuto al cospicuo disturbo causato dalle onde superficiali che avrebbero impedito una corretta visualizzazione.

A causa della mole di dati da acquisire, della difficoltà di post-processing, dovuta alla geometria non convenzionale da analizzare e quindi alla mancanza di adeguati codici esistenti e della ridotta significatività di analizzare centinaia di condizioni di prova (ogni configurazione vista nelle prove di coppia per ogni velocità di rotazione), ci si è limitati ad un caso significativo: la configurazione analizzata è stata quella relativa al Case1, a circa $\omega = -270RPM$, punto in cui la differenza tra i dati di coppia nel caso “Free” e “Fixed” è maggiore (segno che il fenomeno causato dal comportamento della molla non vincolata inizia a farsi sentire).

Inoltre per un’analisi preliminare del campo di moto con tecniche non particolarmente precise non è stato ritenuto significativo analizzare ulteriori condizioni, in quanto difficilmente si sarebbero potute cogliere in maniera precisa differenze significative.

Il proseguimento, anche in questo senso, è lasciato allo sviluppo futuro del lavoro. Si è inoltre evitato di scegliere velocità più elevate per limitare le vibrazioni dell’asta e si è rivelato impossibile analizzare il caso con il cilindro dal diametro minore, in quanto l’interferenza tra le particelle, la molla e la parete interna sarebbe stata intollerabile.

Per creare il piano di luce è stato utilizzato un proiettore con una diapositiva appositamente modificata in maniera tale da stringere la lama di luce in uscita e dirigerla nel modo richiesto.

Come particelle sono stati scelti dei pallini di plastica gialli da 6mm di diametro e 0.12g di massa.

Questa scelta è stata giustificata sia dal fatto di avere particelle visibili e identificabili ad occhio nudo durante il processing dei dati, sia dalla necessità di trovare particelle di densità vicina a quella dell'acqua. La sua densità è stata poi corretta con l'utilizzo di cloruro di sodio in maniera tale da bilanciare il peso dei pallini con la giusta spinta idrostatica da parte del fluido che li circonda.

In ultimo si noti che con questa tecnica non è stato possibile analizzare il flusso tra le spire della molla e l'asse, sia a causa del fatto che la molla stessa nascondeva alla luce il flusso dietro le spire più vicine fra loro, sia per il fatto che i pallini, una volta inglobati, stentavano ad uscire e non potevano dare risultati attendibili a causa delle collisioni con la molla stessa.

È stata utilizzata una fotocamera Canon per i filmati ad alta velocità che sono poi stati analizzati.

Si sono ottenute immagini a 120 fps e con risoluzione di 640x480 pixel. Aumentando la velocità di ripresa si avrebbe avuto un deciso peggioramento della risoluzione rendendo le immagini troppo imprecise; diminuendo invece la velocità di acquisizione si sarebbe potuto migliorare la risoluzione delle immagini ma al prezzo di non riuscire più a cogliere le particelle nel piano di luce per un numero sufficiente di frame. La scelta fatta è stata così il miglior compromesso per ottenere il minore errore possibile.

4.2.1 Two-frame Particle Tracking Velocimetry

La tecnica della Particle Tracking Velocimetry (PTV) permette di determinare la velocità di un fluido a partire dal moto di particelle sospese in esso. Le particelle vengono poi illuminate da un piano di luce. La tecnica si basa sul confronto di due immagini successive:

- Le posizioni delle particelle presenti in un frame vengono annotate in un file grazie al software ImageJ [12].
- Le posizioni delle particelle presenti nel frame successivo vengono annotate nello stesso file.
- Lo spostamento viene calcolato sottraendo le coordinate annotate.
- Le velocità vengono calcolate dividendo lo spostamento per il tempo trascorso tra un frame e l'altro.

Nella PTV usuale, dove la densità di particelle è più elevata che nel nostro caso, può essere necessario predire la posizione della particella nel frame successivo per essere certi che il matching sia corretto.

Nel nostro caso, avendo un seeding abbastanza basso, il matching non ha presentato difficoltà o ambiguità.

Ancora una volta si sottolinea come il campo di moto prodotto con questa tecnica è molto discretizzato e i vettori sono spiccati da posizioni distribuite in maniera random.

Presentiamo ora i due casi analizzati, quello con molla "Free" e quello con molla "Fixed".

Attraverso l'analisi dei filmati relativi alla prima configurazione di prova si possono fare delle interessanti riflessioni e si può cercare di intuire cosa succede nel campo di moto.

Il campo di moto è stato ricostruito attraverso l'analisi, frame-by-frame del filmato a disposizione.

Il moto della molla si presenta come quasi periodico nel caso “Free”, con un periodo di circa 27 frames ($\approx 0.23s$) e perfettamente periodico nel caso “Fixed”, con un periodo di poco più di 26 frames ($\approx 0.22s$).

Sfruttando questa proprietà si è potuto ricostruire il campo di moto per sovrapposizione di immagini, operando una rifasatura per riportarci ad una posizione unica della molla.

Come si potrà notare successivamente (figura 4.21), operando in questo modo si ottiene un campo di moto di difficile lettura (anche se qualche considerazione può esser fatta, come vedremo in seguito). Inoltre ci sono dei vettori che vengono traslati in posizioni errate, come quelli che si notano all’interno della prima cresta a sinistra. Ciò è dovuto al fatto che la geometria della molla è limitata dai piattelli e quindi le creste impiegano un certo spazio (e un certo tempo) ad ergersi pienamente; quindi ad un certo momento nella zona in basso a sinistra c’è una cresta più bassa e i vettori velocità sono in realtà comunque fuori dalla molla.

Per ovviare a questo problema si è pensato di suddividere il periodo in due, quattro e otto fasi, e su ognuna è stata applicata la traslazione dei vettori per rifasare le velocità in ogni parte analizzata.

La figura 4.21 è stata comunque mantenuta perchè dà un’idea del numero di misure effettuate (e quindi dell’adeguatezza del campione) e perchè il trend mostrato coincide con le altre figure.

In ogni grafico, come da legenda, le righe blu rappresentano le dimensioni dei frame, le linee verdi i confini del campo di moto (la linea superiore è la parete del cilindro), la linea gialla è l’asse della molla, disegnata in rosso. Alla fine della linea rossa sono situati i piattelli e sulla parte destra si trova il pelo libero.

Sono inoltre stati calcolati i valori di velocità media relativi a tutto il campo di moto esterno alla molla e alla parte superiore e inferiore, dove la quota di divisione è stata pari a $y = -200$ nei grafici.

Per valutare la bontà dei valori ottenuti è stato inoltre calcolato il valore RMS e per un confronto numerico si riporta anche la velocità di traslazione del fronte dell’onda, pari a $V_{fo} = 461.5mm/s$, dato presente anche in testa alle immagini.

Tutto ciò per ogni situazione graficata.

La suddivisione in fasi del periodo della molla è stata interessante anche per valutare i risultati quantitativi ottenuti e stabilire la presenza o meno di una loro dipendenza dalla fase, a priori problema non triviale.

4.2.2 Case “Fixed”

Ciò che salta subito all’occhio nel caso “Fixed” è la presenza di velocità molto piccole, quasi nulle.

Nei grafici si può notare un comportamento per certi versi simile a quello descritto successivamente (si vede più chiaramente in seguito) nel caso “Free”, anche se su scale di velocità molto ridotte.

Osservando poi i valori delle velocità nelle tabelle si nota come queste siano molto piccole: u e v mediate in tutto il piano risultano nulle o quasi; l’unico valore che si discosta leggermente è la componente radiale (v) della velocità mediata nella parte di piano vicino alla molla (valore maggiore anche nel caso successivo).

Il suo valore è confrontabile con il valore RMS, ma entrambi sono dello stesso ordine dell’incertezza di quantizzazione. Questo conferma anche l’impressione visiva che la componente nel piano della velocità sia veramente molto piccola a confronto del caso “Free”. L’unico dato quantitativamente rilevante è la componente v della velocità media nella parte di campo di moto vicino alla molla, che può indicare un certo trafilamento attraverso le spire.

C’è però da far notare che i valori sono circa la metà dell’incertezza di quantizzazione, pari a circa 60mm/s , e di quasi un ordine di grandezza inferiore rispetto al caso “Free”, come vedremo in seguito.

Quest’ultima considerazione può far sperare nella buona efficacia del mixing in condizione di molla non vincolata, che, sommata alla decisiva riduzione di coppia verificata, può portare a risultati sorprendenti.

Fase singola

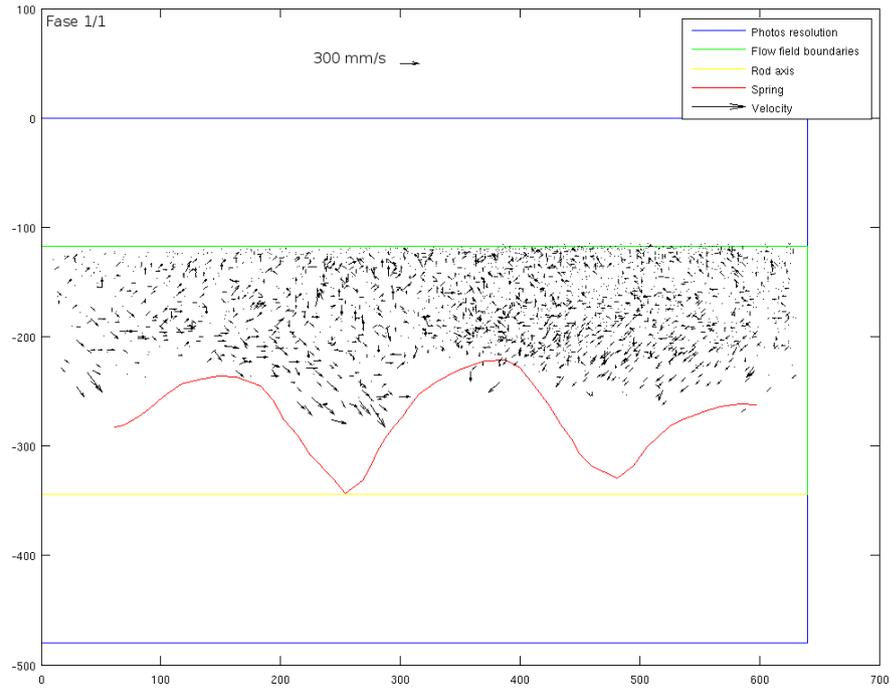


Figura 4.6: Campo di moto con molla “Fixed” - Fase singola.

Parte del campo di moto	u	v
Totale	$-2.1mm/s$	$-1.8mm/s$
Superiore	$-2.4mm/s$	$6.0mm/s$
Inferiore	$-1.1mm/s$	$-32.2mm/s$
Parte del campo di moto	u RMS	v RMS
Totale	$41.8mm/s$	$44.0mm/s$
Superiore	$34.8mm/s$	$37.7mm/s$
Inferiore	$62.0mm/s$	$62.9mm/s$

Tabella 4.3: Velocità campo di moto con molla “Fixed” - Fase 1/1.

Due fasi

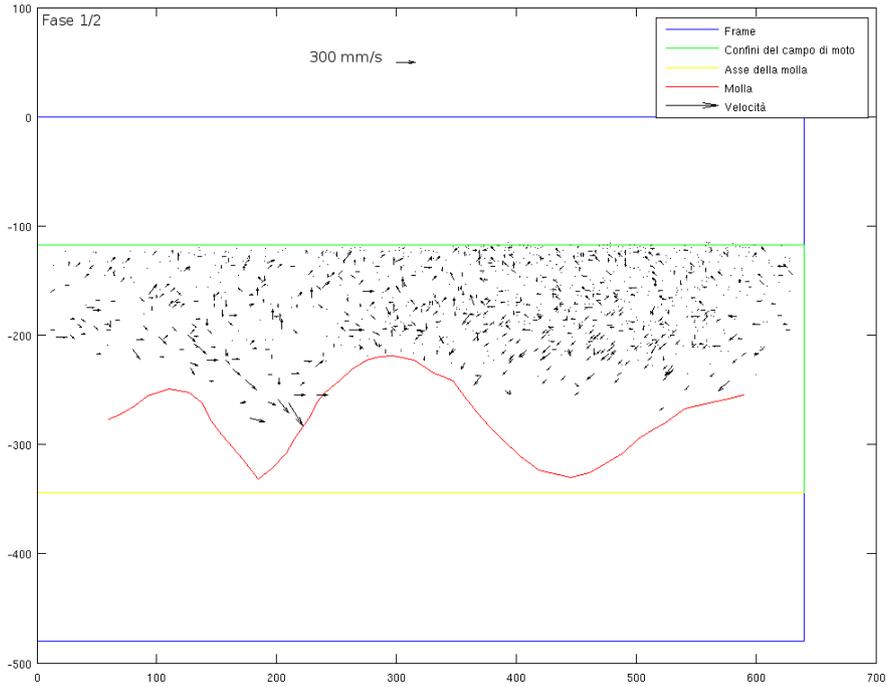


Figura 4.7: Campo di moto con molla "Fixed" - Fase 1/2.

Parte del campo di moto	u	v
Totale	$-2.6mm/s$	$-2.3mm/s$
Superiore	$-2.3mm/s$	$5.5mm/s$
Inferiore	$-4.1mm/s$	$-35.2mm/s$
Parte del campo di moto	u RMS	v RMS
Totale	$42.9mm/s$	$44.1mm/s$
Superiore	$36.1mm/s$	$37.6mm/s$
Inferiore	$64.2mm/s$	$64.6mm/s$

Tabella 4.4: Velocità campo di moto con molla "Fixed" - Fase 1/2.

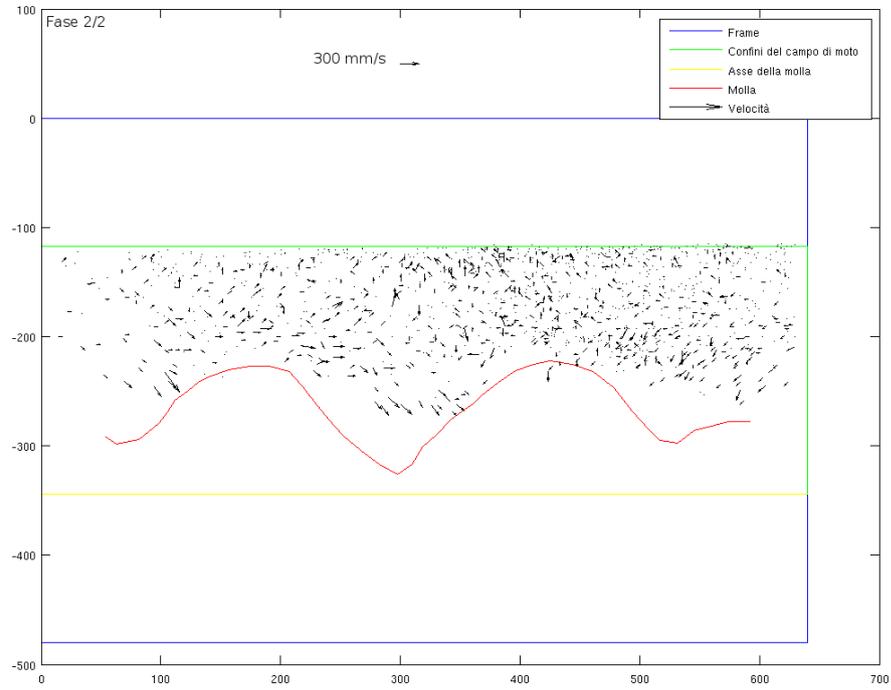


Figura 4.8: Campo di moto con molla “Fixed” - Fase 2/2.

Parte del campo di moto	u	v
Totale	$-1.7mm/s$	$-1.4mm/s$
Superiore	$-2.5mm/s$	$6.5mm/s$
Inferiore	$1.2mm/s$	$-29.9mm/s$
Parte del campo di moto	u RMS	v RMS
Totale	$40.8mm/s$	$44.0mm/s$
Superiore	$33.5mm/s$	$37.8mm/s$
Inferiore	$60.3mm/s$	$61.5mm/s$

Tabella 4.5: Velocità campo di moto con molla “Fixed” - Fase 2/2.

Quattro fasi

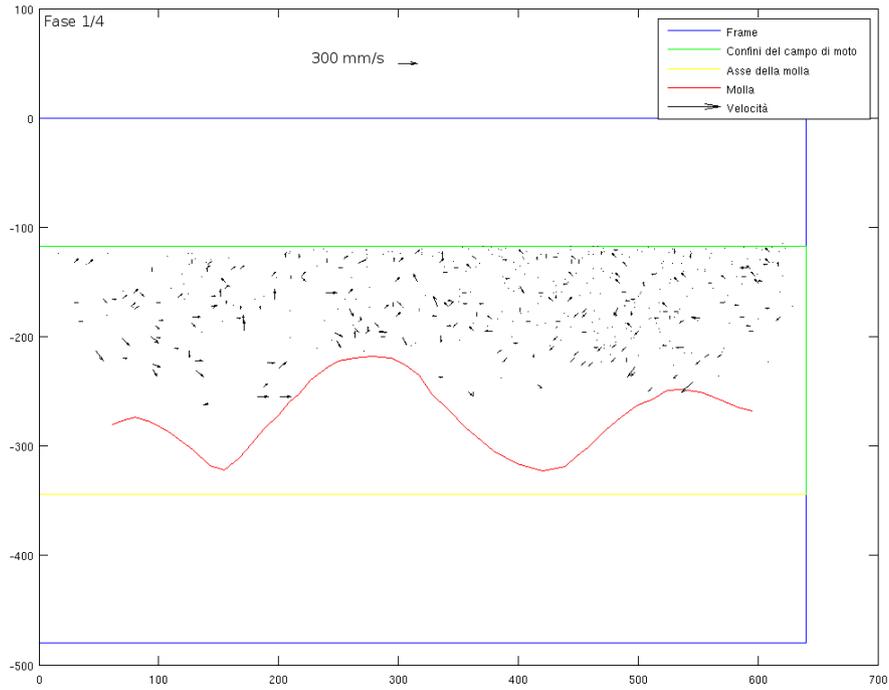


Figura 4.9: Campo di moto con molla "Fixed" - Fase 1/4.

Parte del campo di moto	u	v
Totale	0.2mm/s	1.9mm/s
Superiore	-0.7mm/s	8.4mm/s
Inferiore	4.8mm/s	-28.8mm/s
Parte del campo di moto	u RMS	v RMS
Totale	42.0mm/s	41.1mm/s
Superiore	35.9mm/s	36.2mm/s
Inferiore	63.3mm/s	59.0mm/s

Tabella 4.6: Velocità campo di moto con molla "Fixed" - Fase 1/4.

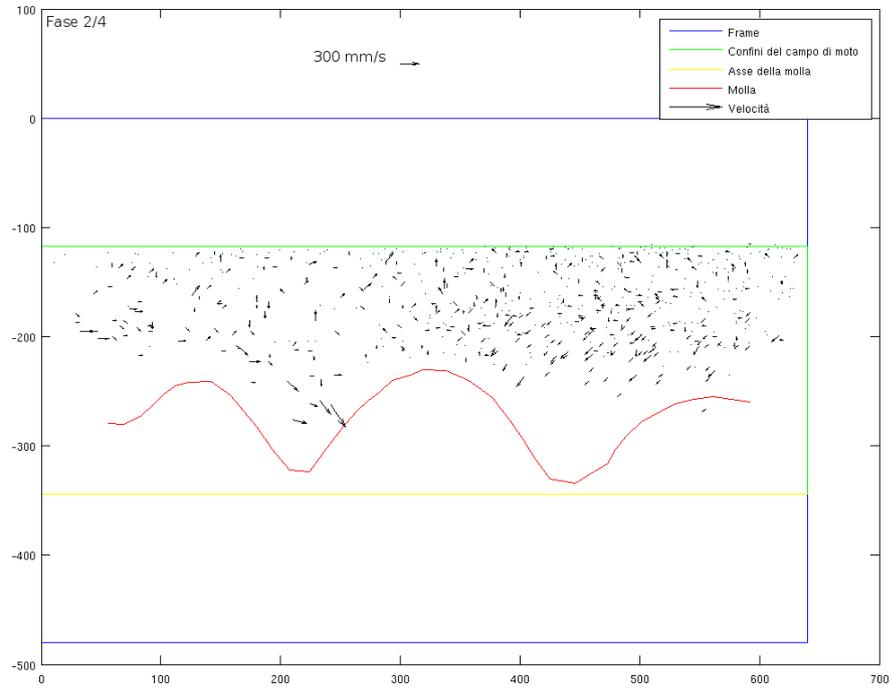


Figura 4.10: Campo di moto con molla "Fixed" - Fase 2/4.

Parte del campo di moto	u	v
Totale	$-4.7mm/s$	$-5.3mm/s$
Superiore	$-3.4mm/s$	$3.3mm/s$
Inferiore	$-9.5mm/s$	$-39.0mm/s$
Parte del campo di moto	u RMS	v RMS
Totale	$43.6mm/s$	$46.1mm/s$
Superiore	$36.2mm/s$	$38.6mm/s$
Inferiore	$64.7mm/s$	$67.8mm/s$

Tabella 4.7: Velocità campo di moto con molla "Fixed" - Fase 2/4.

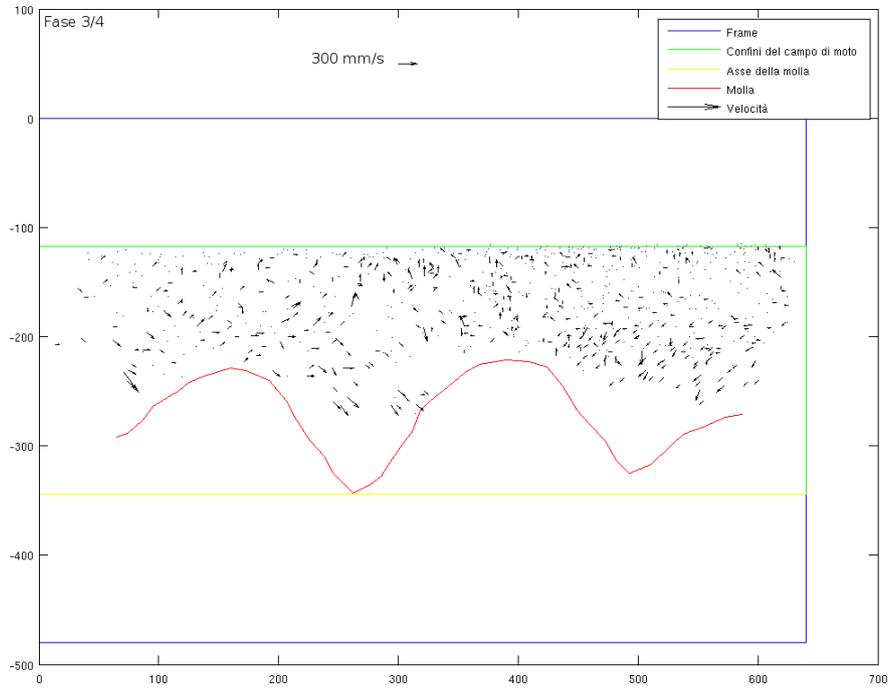


Figura 4.11: Campo di moto con molla “Fixed” - Fase 3/4.

Parte del campo di moto	u	v
Totale	$-2.1mm/s$	$-0.4mm/s$
Superiore	$-3.1mm/s$	$8.5mm/s$
Inferiore	$1.3mm/s$	$-33.5mm/s$
Parte del campo di moto	u RMS	v RMS
Totale	$41.9mm/s$	$47.7mm/s$
Superiore	$34.4mm/s$	$40.5mm/s$
Inferiore	$62.2mm/s$	$68.1mm/s$

Tabella 4.8: Velocità campo di moto con molla “Fixed” - Fase 3/4.

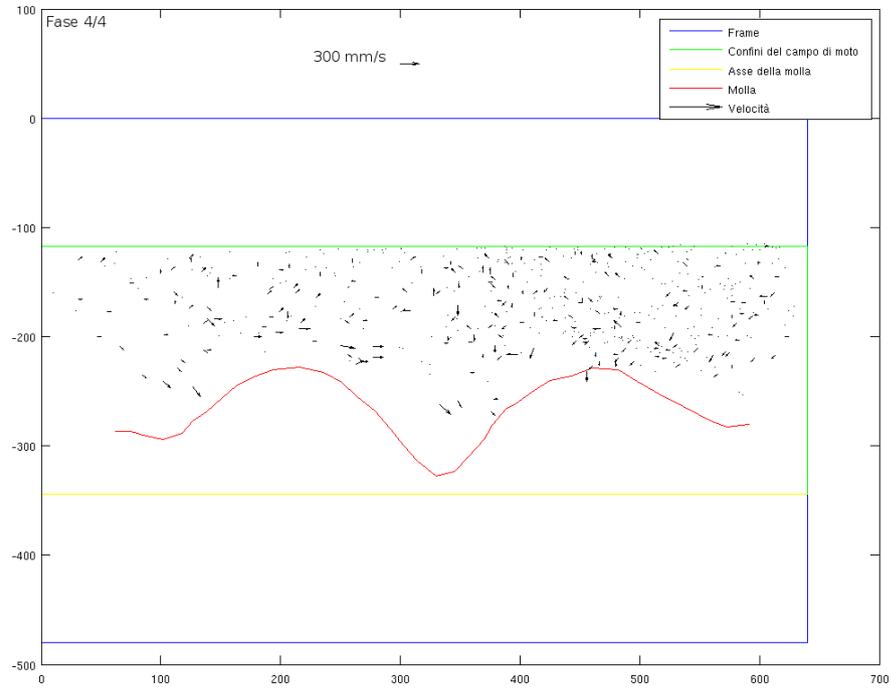


Figura 4.12: Campo di moto con molla “Fixed” - Fase 4/4.

Parte del campo di moto	u	v
Totale	-1.0mm/s	-2.8mm/s
Superiore	-1.5mm/s	3.4mm/s
Inferiore	1.0mm/s	-24.7mm/s
Parte del campo di moto	u RMS	v RMS
Totale	39.2mm/s	37.4mm/s
Superiore	32.1mm/s	33.0mm/s
Inferiore	57.4mm/s	50.0mm/s

Tabella 4.9: Velocità campo di moto con molla “Fixed” - Fase 4/4.

Otto fasi

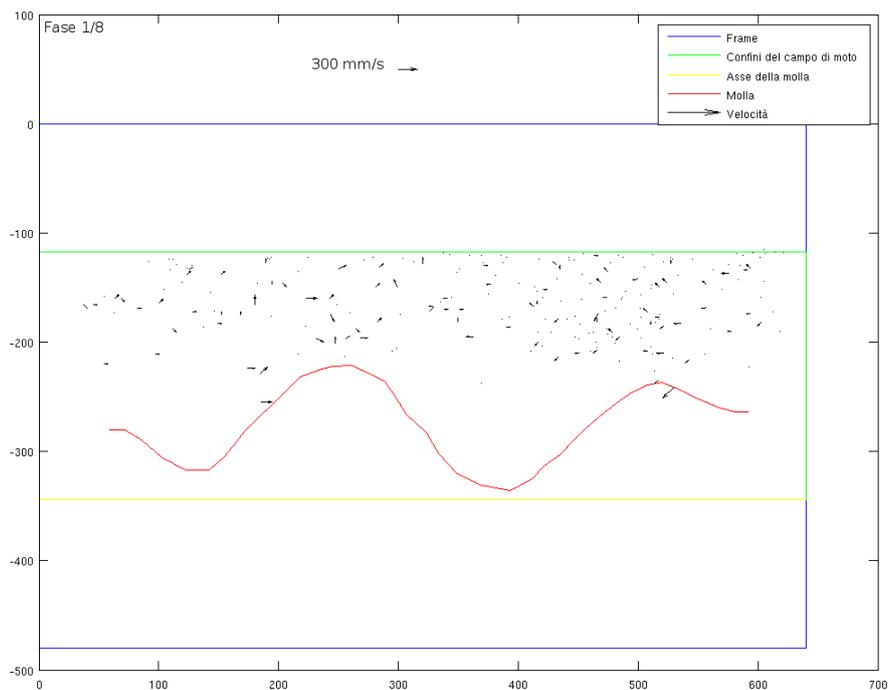


Figura 4.13: Campo di moto con molla "Fixed" - Fase 1/8.

Parte del campo di moto	u	v
Totale	$-1.3mm/s$	$2.8mm/s$
Superiore	$-0.6mm/s$	$4.5mm/s$
Inferiore	$-5.2mm/s$	$-7.0mm/s$
Parte del campo di moto	u RMS	v RMS
Totale	$42.9mm/s$	$36.2mm/s$
Superiore	$38.5mm/s$	$34.0mm/s$
Inferiore	$62.7mm/s$	$47.1mm/s$

Tabella 4.10: Velocità campo di moto con molla "Fixed" - Fase 1/8.

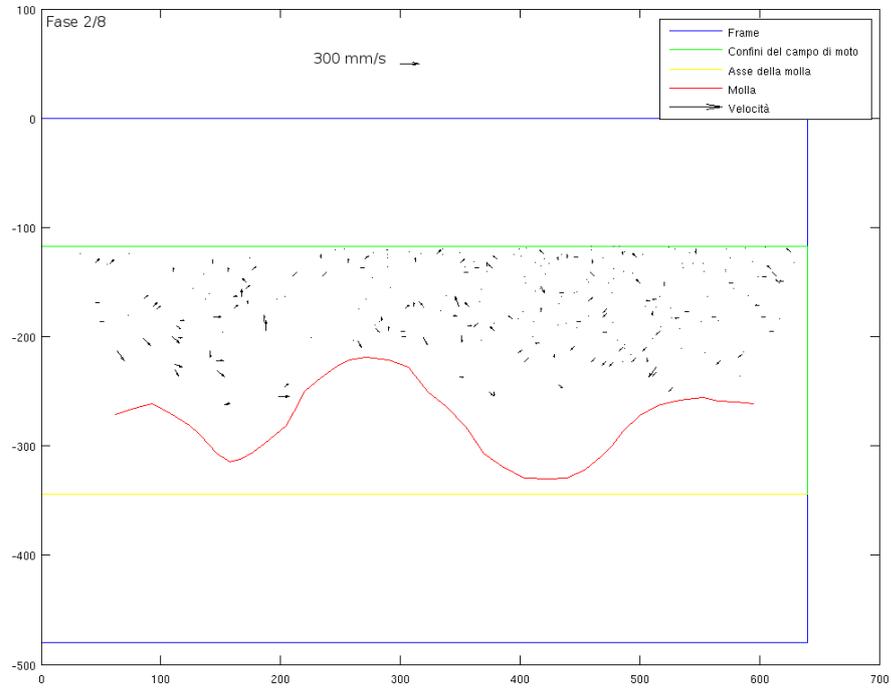


Figura 4.14: Campo di moto con molla "Fixed" - Fase 2/8.

Parte del campo di moto	u	v
Totale	$1.6mm/s$	$1.1mm/s$
Superiore	$-0.9mm/s$	$12.2mm/s$
Inferiore	$11.3mm/s$	$-43.0mm/s$
Parte del campo di moto	u RMS	v RMS
Totale	$41.1mm/s$	$45.1mm/s$
Superiore	$33.1mm/s$	$38.2mm/s$
Inferiore	$63.6mm/s$	$65.6mm/s$

Tabella 4.11: Velocità campo di moto con molla "Fixed" - Fase 2/8.

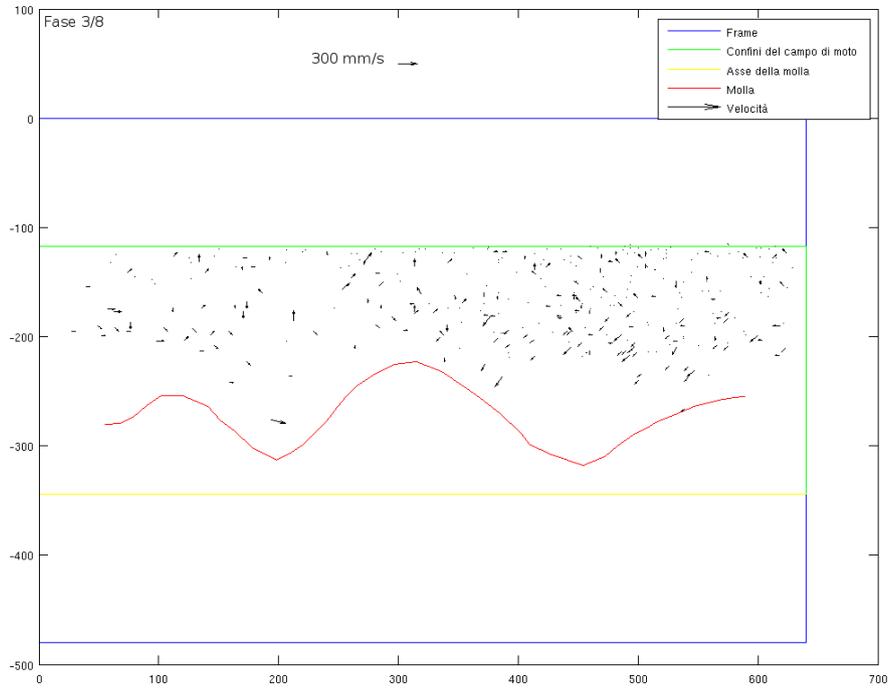


Figura 4.15: Campo di moto con molla “Fixed” - Fase 3/8.

Parte del campo di moto	u	v
Totale	$-6.3mm/s$	$-4.5mm/s$
Superiore	$-2.9mm/s$	$2.9mm/s$
Inferiore	$-21.8mm/s$	$-37.8mm/s$
Parte del campo di moto	u RMS	v RMS
Totale	$41.8mm/s$	$45.3mm/s$
Superiore	$36.1mm/s$	$42.5mm/s$
Inferiore	$61.4mm/s$	$56.3mm/s$

Tabella 4.12: Velocità campo di moto con molla “Fixed” - Fase 3/8.

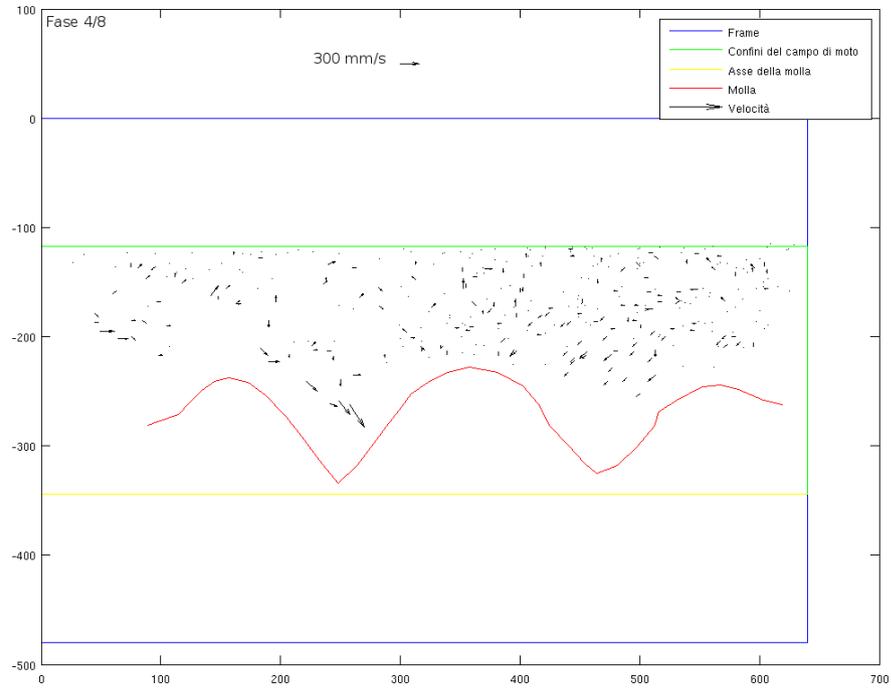


Figura 4.16: Campo di moto con molla “Fixed” - Fase 4/8.

Parte del campo di moto	u	v
Totale	$-3.0mm/s$	$-6.2mm/s$
Superiore	$-3.9mm/s$	$3.7mm/s$
Inferiore	$0.0mm/s$	$-39.9mm/s$
Parte del campo di moto	u RMS	v RMS
Totale	$45.2mm/s$	$46.8mm/s$
Superiore	$36.4mm/s$	$34.0mm/s$
Inferiore	$67.3mm/s$	$75.6mm/s$

Tabella 4.13: Velocità campo di moto con molla “Fixed” - Fase 4/8.

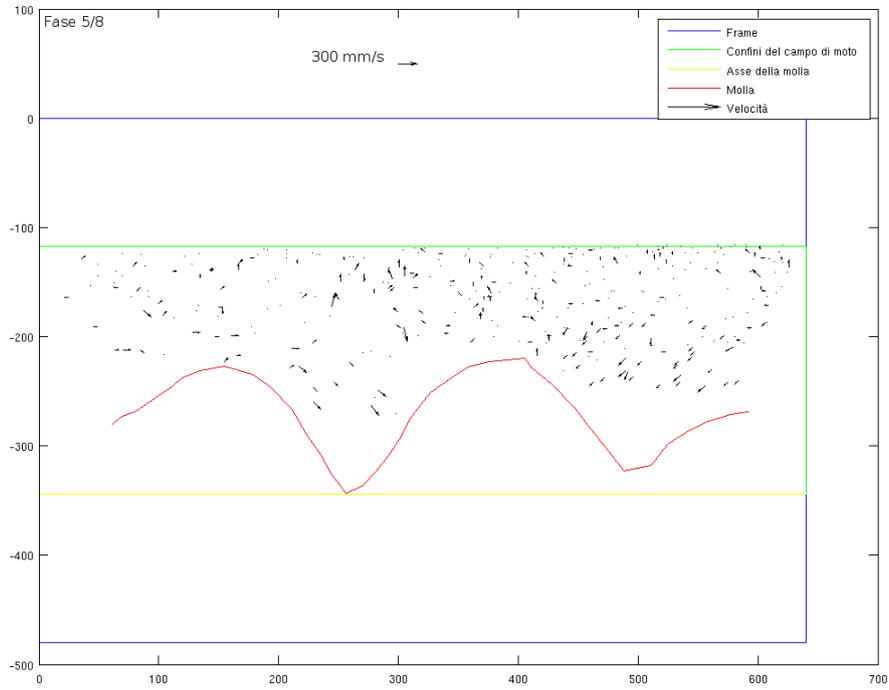


Figura 4.17: Campo di moto con molla “Fixed” - Fase 5/8.

Parte del campo di moto	u	v
Totale	$-4.6mm/s$	$0.8mm/s$
Superiore	$-3.2mm/s$	$9.0mm/s$
Inferiore	$-10.6mm/s$	$-32.5mm/s$
Parte del campo di moto	u RMS	v RMS
Totale	$39.5mm/s$	$48.0mm/s$
Superiore	$32.2mm/s$	$44.4mm/s$
Inferiore	$60.9mm/s$	$60.5mm/s$

Tabella 4.14: Velocità campo di moto con molla “Fixed” - Fase 5/8.

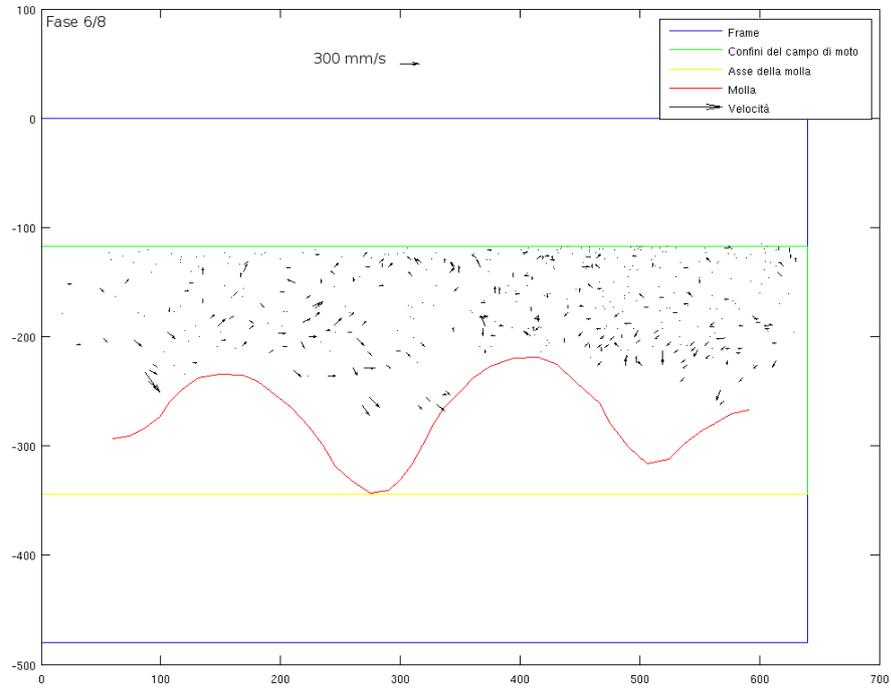


Figura 4.18: Campo di moto con molla "Fixed" - Fase 6/8.

Parte del campo di moto	u	v
Totale	-0.1mm/s	-1.4mm/s
Superiore	-3.0mm/s	8.1mm/s
Inferiore	9.7mm/s	-34.3mm/s
Parte del campo di moto	u RMS	v RMS
Totale	43.7mm/s	47.5mm/s
Superiore	36.2mm/s	37.1mm/s
Inferiore	63.1mm/s	73.1mm/s

Tabella 4.15: Velocità campo di moto con molla "Fixed" - Fase 6/8.

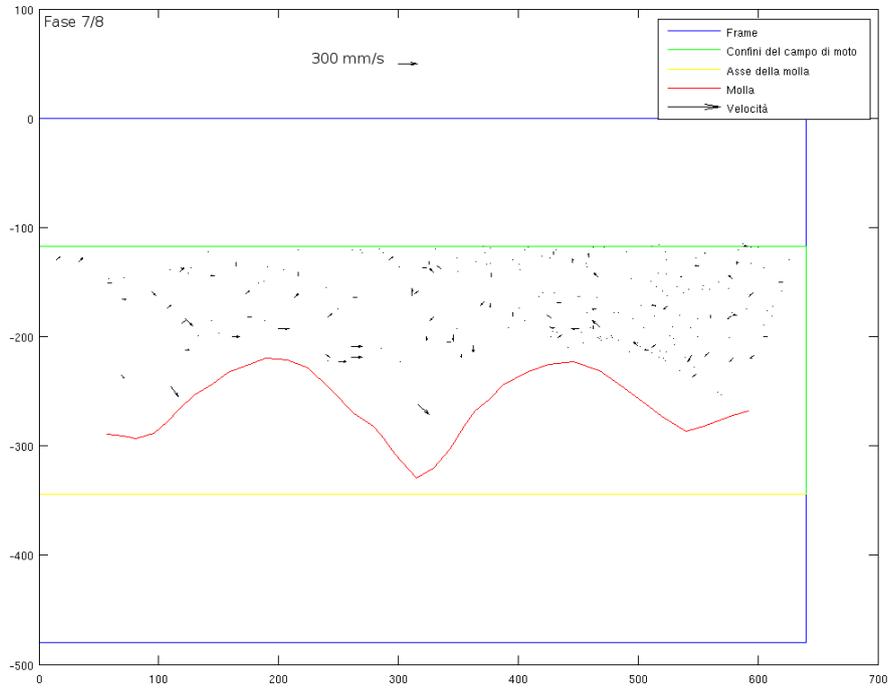


Figura 4.19: Campo di moto con molla “Fixed” - Fase 7/8.

Parte del campo di moto	u	v
Totale	1.8mm/s	-3.1mm/s
Superiore	-0.3mm/s	1.3mm/s
Inferiore	8.5mm/s	-19.2mm/s
Parte del campo di moto	u RMS	v RMS
Totale	40.2mm/s	35.7mm/s
Superiore	33.4mm/s	31.3mm/s
Inferiore	56.6mm/s	47.1mm/s

Tabella 4.16: Velocità campo di moto con molla “Fixed” - Fase 7/8.

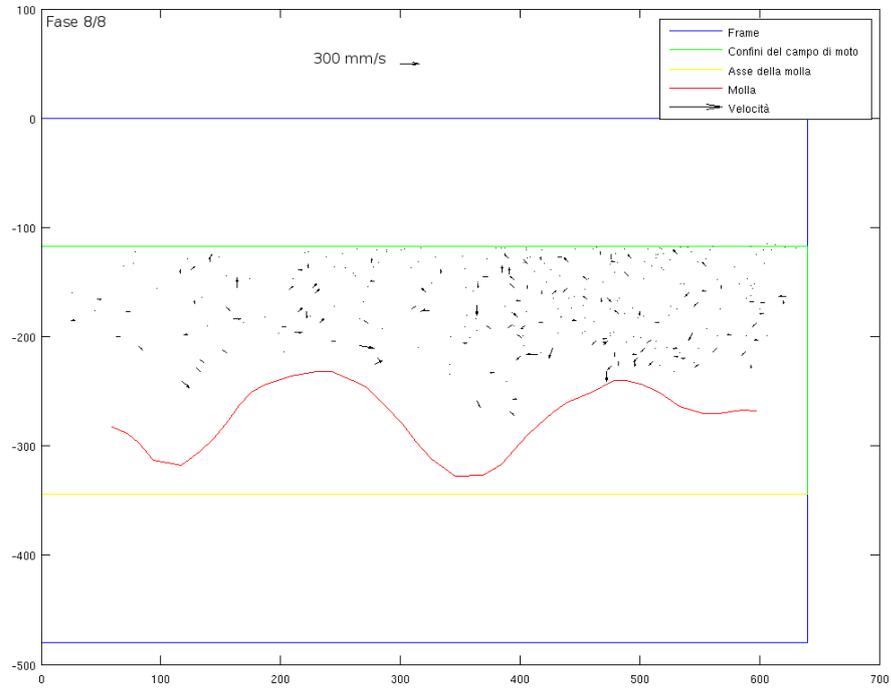


Figura 4.20: Campo di moto con molla “Fixed” - Fase 8/8.

Parte del campo di moto	u	v
Totale	$-3.0mm/s$	$-2.7mm/s$
Superiore	$-2.4mm/s$	$4.3mm/s$
Inferiore	$-5.5mm/s$	$-29.3mm/s$
Parte del campo di moto	u RMS	v RMS
Totale	$38.4mm/s$	$38.7mm/s$
Superiore	$31.2mm/s$	$34.1mm/s$
Inferiore	$58.1mm/s$	$52.4mm/s$

Tabella 4.17: Velocità campo di moto con molla “Fixed” - Fase 8/8.

4.2.3 Case “Free”

Dalla figura 4.21 si possono notare un po' di cose:

- Innanzitutto si nota come il campo di moto presenta le velocità maggiori nella parte inferiore, vicino alla molla. Confrontando i vettori con la scala (presente in testa all'immagine), si nota come solo in queste zone ci sono velocità significative, confrontabili con la velocità di avanzamento del fronte d'onda della molla.
- A tal proposito si nota come la velocità a sinistra di ogni cresta sia rivolta verso l'asse e verso il pelo libero (verso destra nelle immagini). Ciò può essere collegato al fatto che il fluido dietro la molla viene trascinato dalla molla nel suo movimento.
- A destra di ogni cresta, in alto invece si nota una zona di contro-flusso, che presumibilmente (non ci sono dati 3D) scivola intorno alla molla e scorre in direzione opposta.
- Si nota inoltre una zona dove i vettori non sono presenti, in basso a destra di ogni cresta. Ciò è compatibile con una possibile spiegazione, riportata in seguito, del fenomeno nel caso in analisi.

Uno sguardo d'insieme al campo di moto dell'immagine e ai valori tabulati in tabella 4.18 mostra come, guardando la velocità mediata su tutta la superficie del piano sia presente un valore in direzione x trascurabile, in quanto pari a circa il 10% del valore RMS nella stessa direzione e quindi considerabile un errore di misura. Inoltre si tenga presente che l'incertezza dovuta alla quantizzazione è di circa 60mm/s , quindi maggiore del valore in questione.

Un'altra cosa che si può notare è la componente y della velocità: il valor medio è di circa -36mm/s , valore anche questo trascurabile se si guarda alla quantizzazione, anche se il rapporto con il valore RMS è maggiore rispetto alla componente u .

Interessante è inoltre l'analisi che si può ottenere dividendo il campo di moto in due parti: la parte superiore (lontano dalla molla) e la parte inferiore delle immagini. Si può facilmente notare come i valori della velocità media nella parte superiore siano molto piccoli, segno che il flusso è praticamente perpendicolare al piano.

Per quanto riguarda i valori medi delle velocità nella parte inferiore invece il discorso è diverso. I numeri infatti sono confrontabili sia con i valori RMS, sia con la velocità di spostamento del fronte d'onda.

Si nota un moto medio verso destra: l'effetto di trascinamento dovuto alla traslazione assiale della molla è più grande rispetto alla contro-corrente verso sinistra.

Ancora più marcata è la tendenza del flusso ad andare verso l'asse della molla, cosa questa che potrebbe indicare un trafilamento attraverso le spire della molla. Ciò potrebbe essere confermato anche dal fatto che nelle zone in basso a destra delle creste non vi è la presenza di pallini (e quindi di vettori in figura), cosa che potrebbe essere compatibile con la presenza di un flusso in quelle zone verso l'esterno che bilanci il valore ottenuto per v .

Questo supposto comportamento potrebbe essere d'aiuto all'efficienza del mixing.

Lo stesso discorso fatto nel caso a “fase singola” può essere fatto anche nei casi a più fasi. Il comportamento descritto infatti si riscontra in ognuna delle figure seguenti ed in ogni tabella.

Fase singola

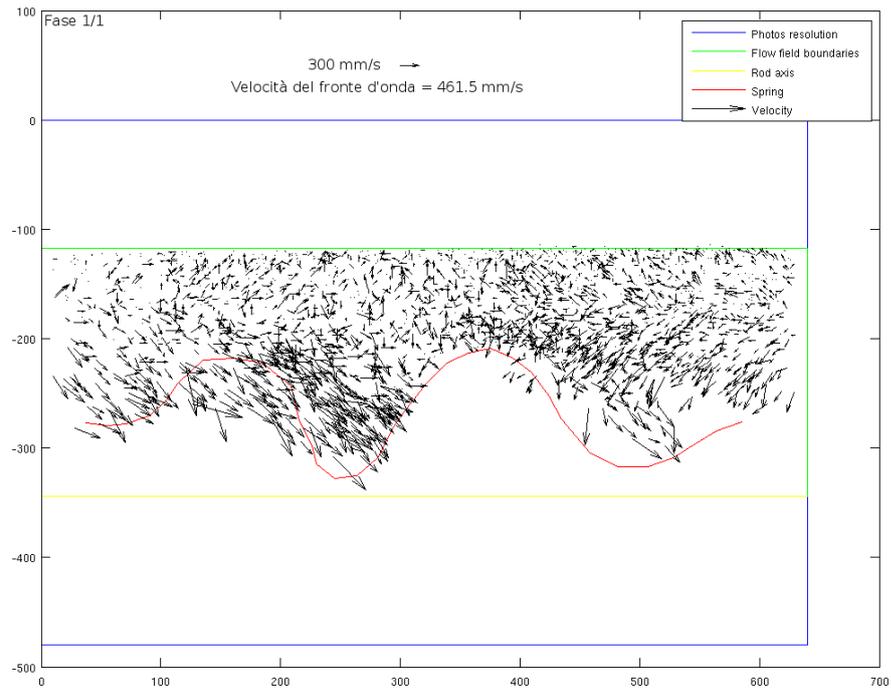


Figura 4.21: Campo di moto con molla “Free” - Fase singola.

Parte del campo di moto	u	v
Totale	12.6mm/s	-35.8mm/s
Superiore	-13.4mm/s	8.0mm/s
Inferiore	72.4mm/s	-136.2mm/s
Parte del campo di moto	u RMS	v RMS
Totale	123.2mm/s	128.5mm/s
Superiore	75.4mm/s	79.5mm/s
Inferiore	192.2mm/s	199.7mm/s

Tabella 4.18: Velocità campo di moto con molla “Free” - Fase 1/1.

Due fasi

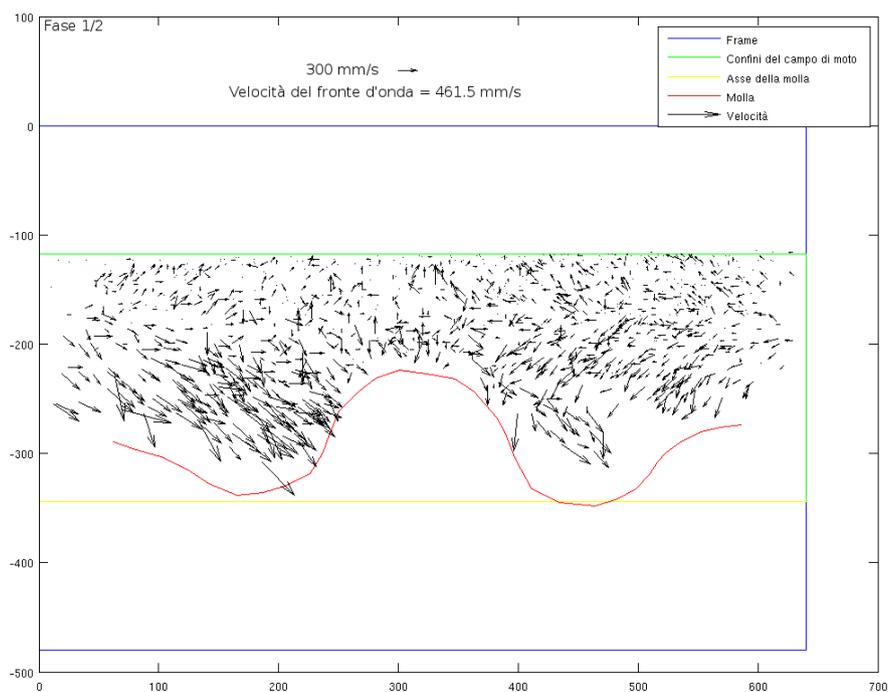


Figura 4.22: Campo di moto con molla “Free” - Fase 1/2.

Parte del campo di moto	u	v
Totale	15.8mm/s	-43.9mm/s
Superiore	-12.4mm/s	8.3mm/s
Inferiore	74.3mm/s	-152.1mm/s
Parte del campo di moto	u RMS	v RMS
Totale	134.8mm/s	137.0mm/s
Superiore	78.7mm/s	82.0mm/s
Inferiore	207.3mm/s	209.2mm/s

Tabella 4.19: Velocità campo di moto con molla “Free” - Fase 1/2.

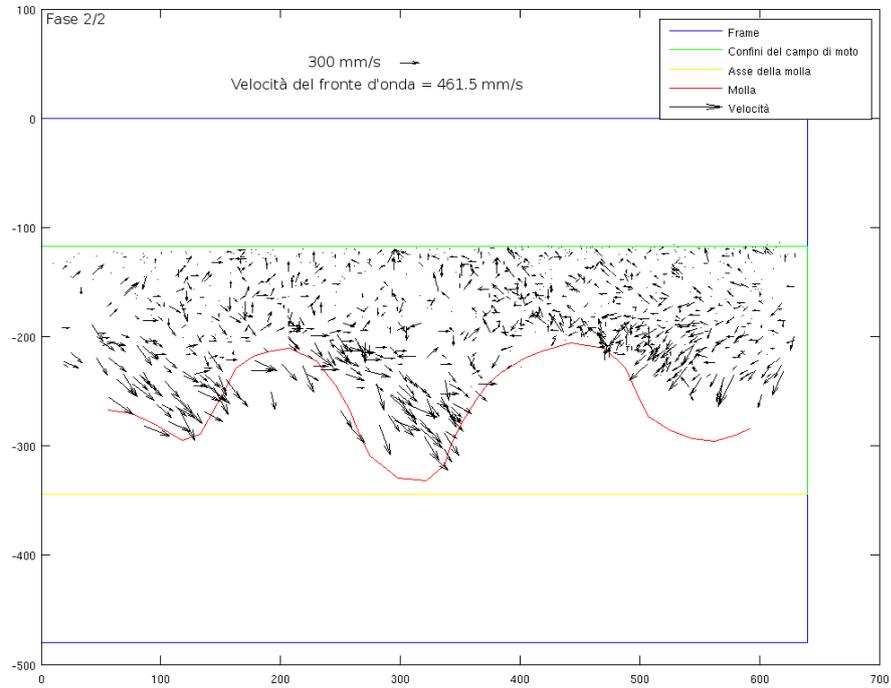


Figura 4.23: Campo di moto con molla “Free” - Fase 2/2.

Parte del campo di moto	u	v
Totale	9.1mm/s	-26.8mm/s
Superiore	-14.5mm/s	7.7mm/s
Inferiore	69.9mm/s	-115.8mm/s
Parte del campo di moto	u RMS	v RMS
Totale	109.0mm/s	118.5mm/s
Superiore	71.7mm/s	76.8mm/s
Inferiore	171.0mm/s	187.0mm/s

Tabella 4.20: Velocità campo di moto con molla “Free” - Fase 2/2.

Quattro fasi

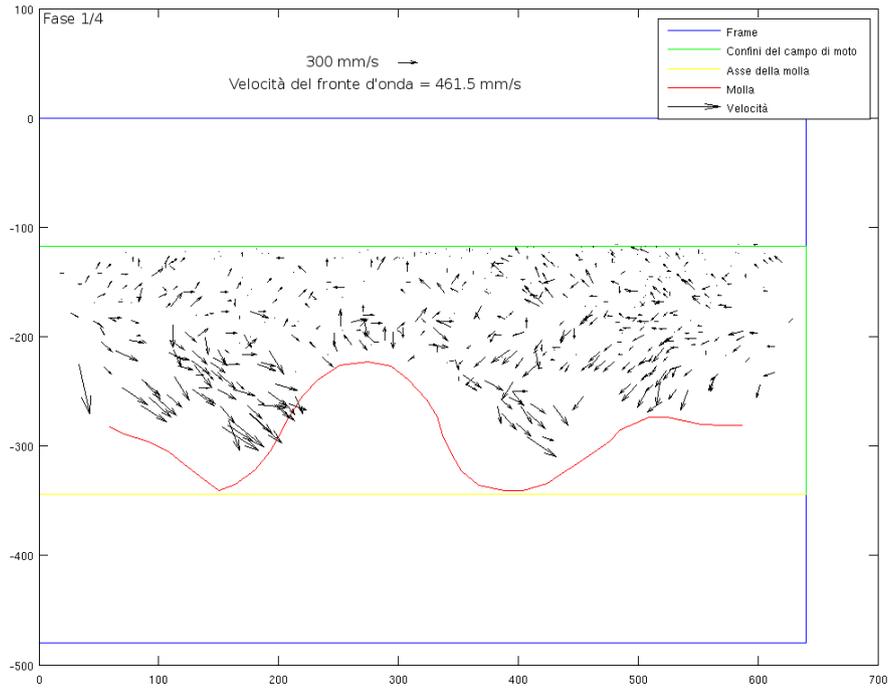


Figura 4.24: Campo di moto con molla “Free” - Fase 1/4.

Parte del campo di moto	u	v
Totale	11.8mm/s	-38.9mm/s
Superiore	-12.0mm/s	12.7mm/s
Inferiore	59.6mm/s	-142.5mm/s
Parte del campo di moto	u RMS	v RMS
Totale	130.0mm/s	134.4mm/s
Superiore	79.5mm/s	82.3mm/s
Inferiore	195.4mm/s	201.9mm/s

Tabella 4.21: Velocità campo di moto con molla “Free” - Fase 1/4.

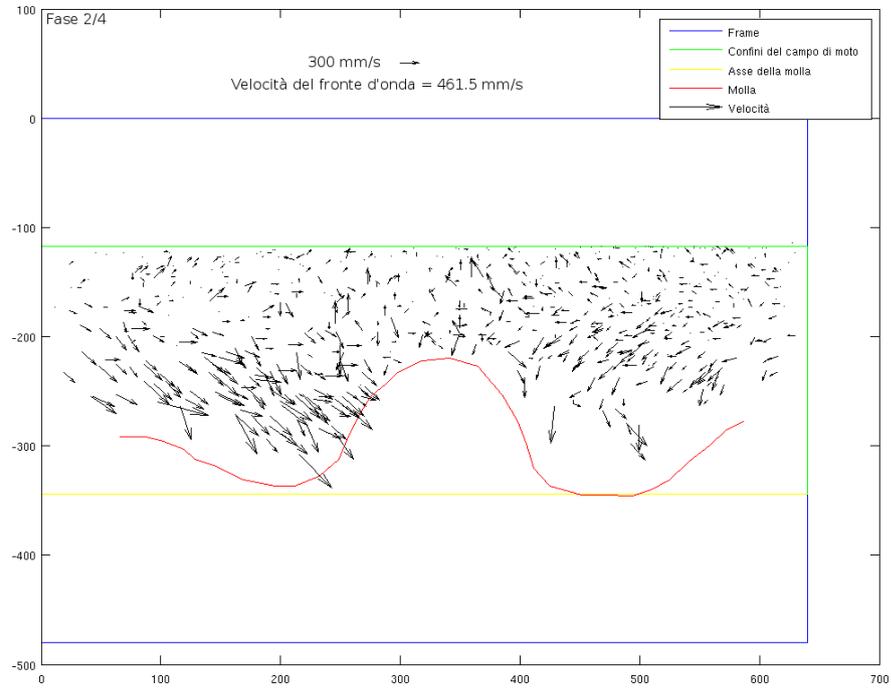


Figura 4.25: Campo di moto con molla “Free” - Fase 2/4.

Parte del campo di moto	u	v
Totale	19.0mm/s	-47.9mm/s
Superiore	-12.7mm/s	4.9mm/s
Inferiore	86.3mm/s	-160.0mm/s
Parte del campo di moto	u RMS	v RMS
Totale	138.4mm/s	139.0mm/s
Superiore	78.2mm/s	81.7mm/s
Inferiore	216.5mm/s	214.9mm/s

Tabella 4.22: Velocità campo di moto con molla “Free” - Fase 2/4.

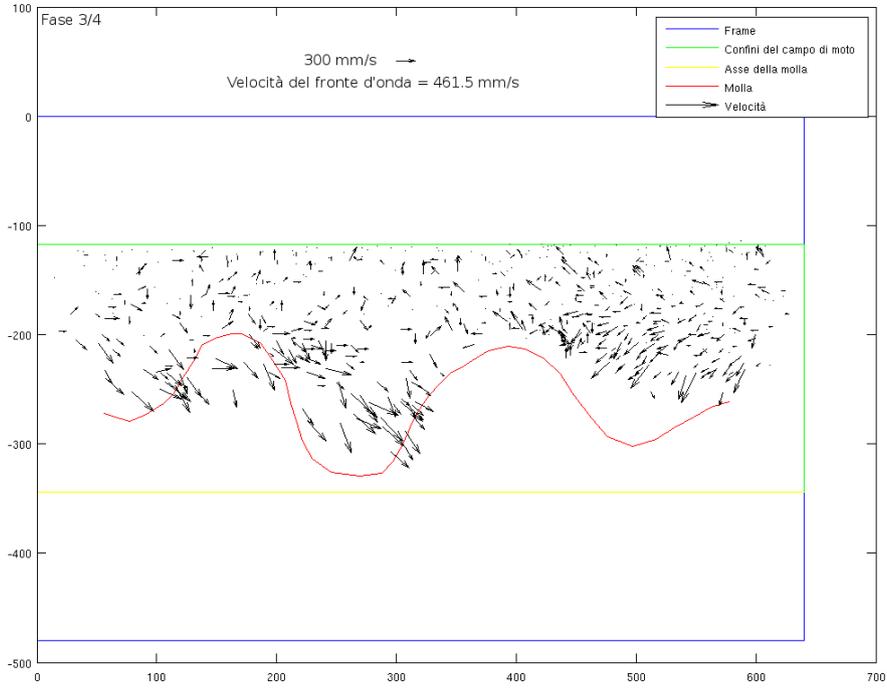


Figura 4.26: Campo di moto con molla “Free” - Fase 3/4.

Parte del campo di moto	u	v
Totale	4.8mm/s	-32.3mm/s
Superiore	-17.5mm/s	8.9mm/s
Inferiore	57.4mm/s	-129.4mm/s
Parte del campo di moto	u RMS	v RMS
Totale	113.3mm/s	125.1mm/s
Superiore	73.1mm/s	74.7mm/s
Inferiore	174.7mm/s	198.4mm/s

Tabella 4.23: Velocità campo di moto con molla “Free” - Fase 3/4.

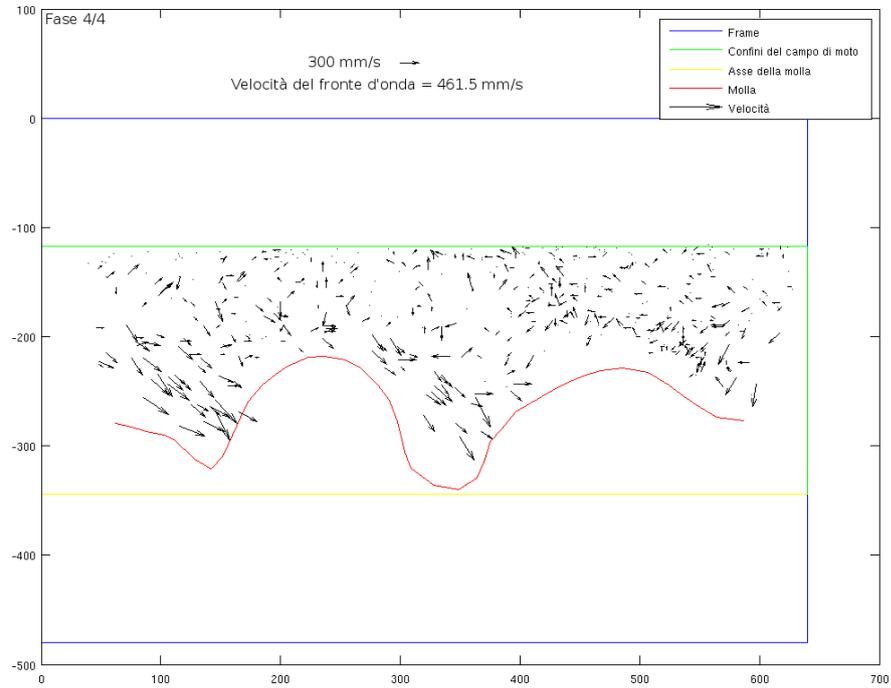


Figura 4.27: Campo di moto con molla “Free” - Fase 4/4.

Parte del campo di moto	u	v
Totale	14.6mm/s	-19.9mm/s
Superiore	-10.9mm/s	6.3mm/s
Inferiore	88.4mm/s	-95.7mm/s
Parte del campo di moto	u RMS	v RMS
Totale	103.3mm/s	109.6mm/s
Superiore	70.1mm/s	79.3mm/s
Inferiore	165.3mm/s	168.8mm/s

Tabella 4.24: Velocità campo di moto con molla “Free” - Fase 4/4.

Otto fasi

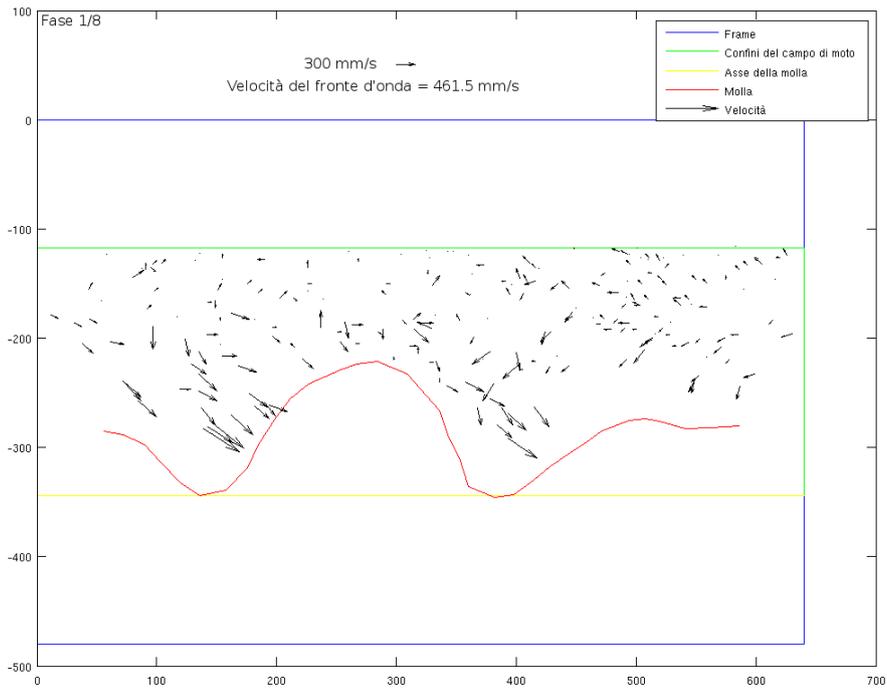


Figura 4.28: Campo di moto con molla “Free” - Fase 1/8.

Parte del campo di moto	u	v
Totale	$17.8mm/s$	$-44.1mm/s$
Superiore	$-14.1mm/s$	$6.5mm/s$
Inferiore	$87.8mm/s$	$-154.7mm/s$
Parte del campo di moto	u RMS	v RMS
Totale	$134.0mm/s$	$131.1mm/s$
Superiore	$80.4mm/s$	$83.9mm/s$
Inferiore	$207.5mm/s$	$198.5mm/s$

Tabella 4.25: Velocità campo di moto con molla “Free” - Fase 1/8.

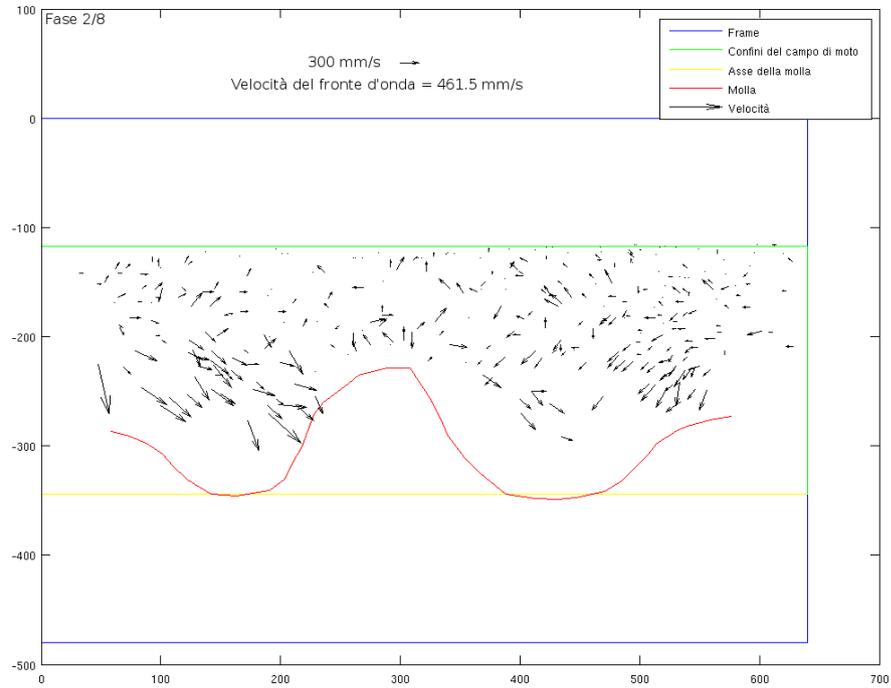


Figura 4.29: Campo di moto con molla “Free” - Fase 2/8.

Parte del campo di moto	u	v
Totale	7.6mm/s	-35.3mm/s
Superiore	-10.5mm/s	17.1mm/s
Inferiore	42.0mm/s	-134.8mm/s
Parte del campo di moto	u RMS	v RMS
Totale	127.2mm/s	136.6mm/s
Superiore	78.8mm/s	81.2mm/s
Inferiore	187.3mm/s	204.0mm/s

Tabella 4.26: Velocità campo di moto con molla “Free” - Fase 2/8.

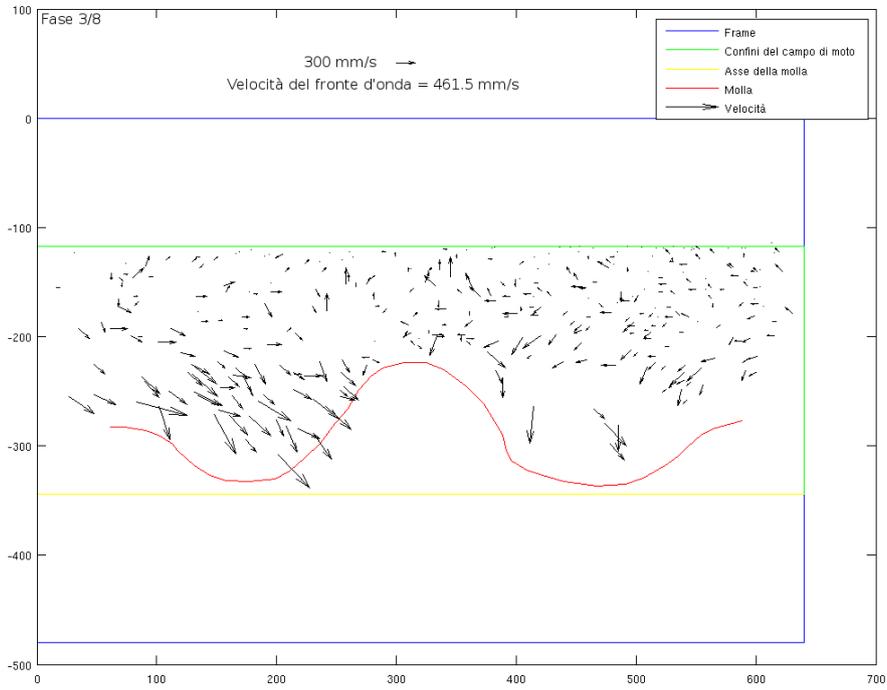


Figura 4.30: Campo di moto con molla “Free” - Fase 3/8.

Parte del campo di moto	u	v
Totale	21.4mm/s	-51.6mm/s
Superiore	-17.6mm/s	4.0mm/s
Inferiore	107.2mm/s	-173.6mm/s
Parte del campo di moto	u RMS	v RMS
Totale	144.2mm/s	146.0mm/s
Superiore	80.4mm/s	79.8mm/s
Inferiore	228.7mm/s	232.7mm/s

Tabella 4.27: Velocità campo di moto con molla “Free” - Fase 3/8.

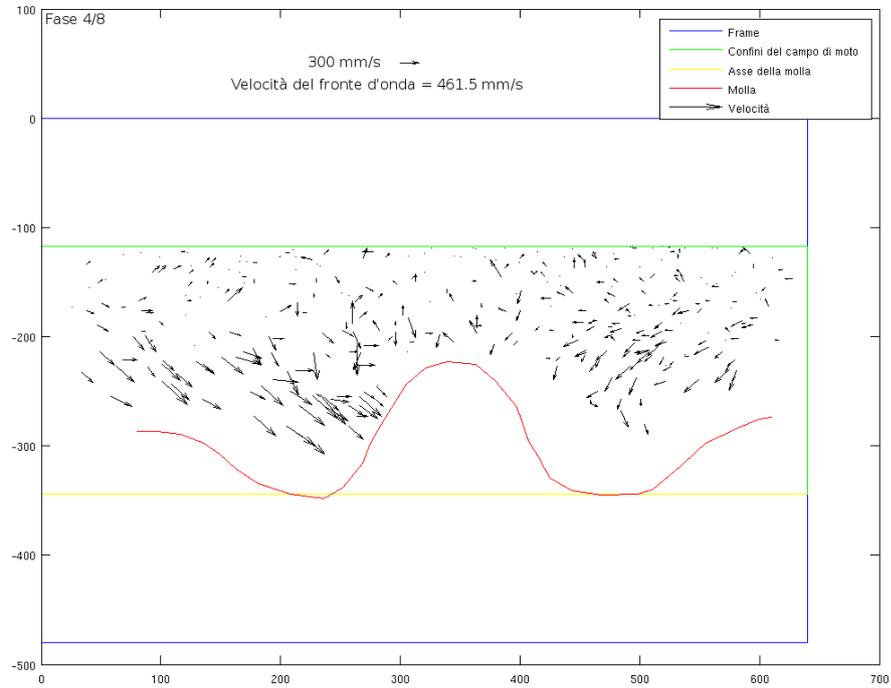


Figura 4.31: Campo di moto con molla “Free” - Fase 4/8.

Parte del campo di moto	u	v
Totale	16.6mm/s	-44.3mm/s
Superiore	-7.9mm/s	5.9mm/s
Inferiore	66.8mm/s	-147.3mm/s
Parte del campo di moto	u RMS	v RMS
Totale	132.6mm/s	131.8mm/s
Superiore	75.8mm/s	83.5mm/s
Inferiore	204.6mm/s	196.8mm/s

Tabella 4.28: Velocità campo di moto con molla “Free” - Fase 4/8.

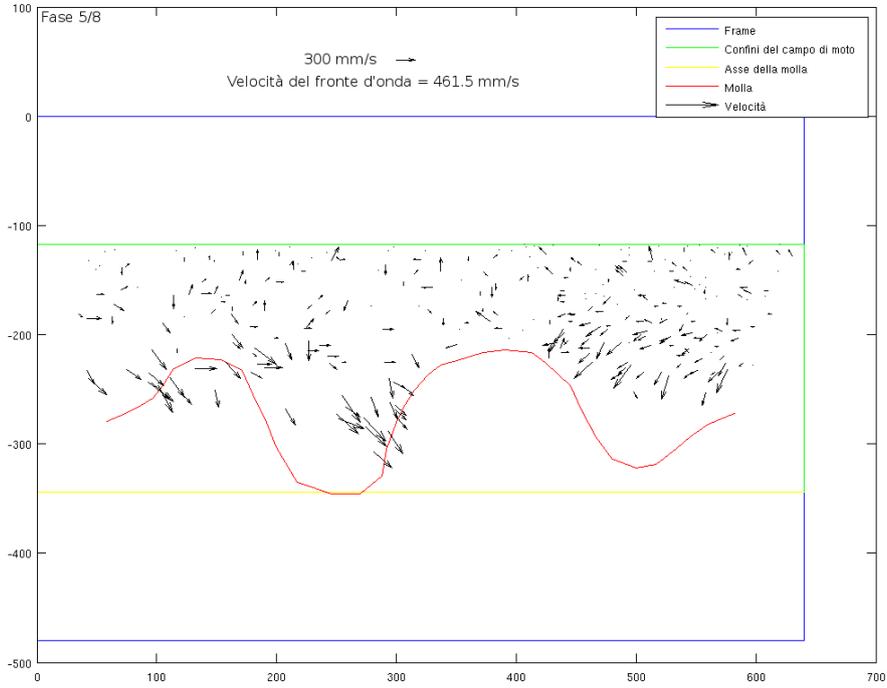


Figura 4.32: Campo di moto con molla “Free” - Fase 5/8.

Parte del campo di moto	u	v
Totale	2.8mm/s	-45.1mm/s
Superiore	-16.7mm/s	4.4mm/s
Inferiore	45.2mm/s	-152.9mm/s
Parte del campo di moto	u RMS	v RMS
Totale	117.7mm/s	132.7mm/s
Superiore	72.7mm/s	76.0mm/s
Inferiore	180.4mm/s	208.2mm/s

Tabella 4.29: Velocità campo di moto con molla “Free” - Fase 5/8.

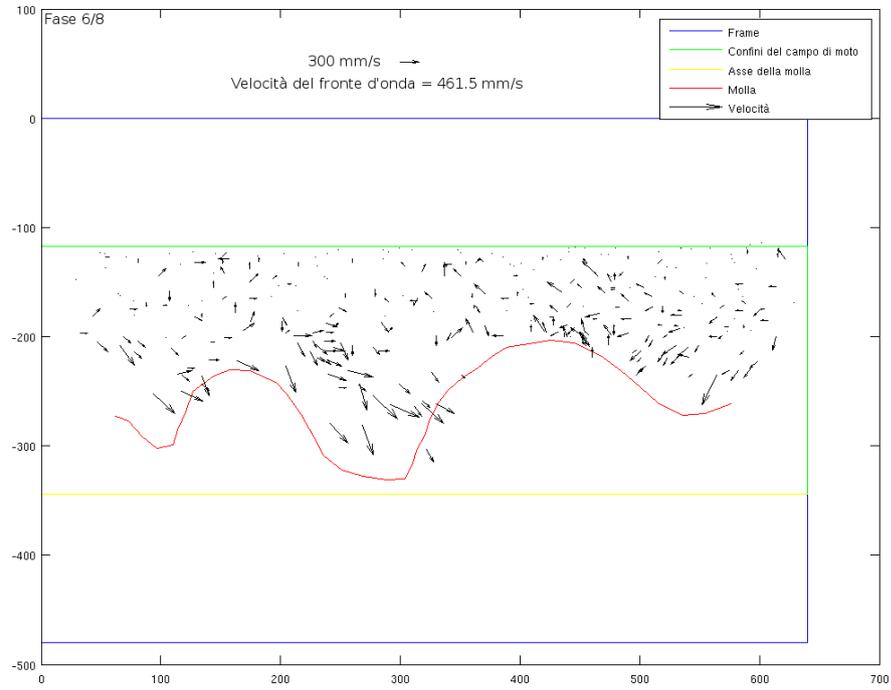


Figura 4.33: Campo di moto con molla "Free" - Fase 6/8.

Parte del campo di moto	u	v
Totale	6.8mm/s	-19.7mm/s
Superiore	-18.2mm/s	13.1mm/s
Inferiore	70.8mm/s	-103.6mm/s
Parte del campo di moto	u RMS	v RMS
Totale	108.8mm/s	117.1mm/s
Superiore	73.5mm/s	73.5mm/s
Inferiore	168.2mm/s	186.9mm/s

Tabella 4.30: Velocità campo di moto con molla "Free" - Fase 6/8.

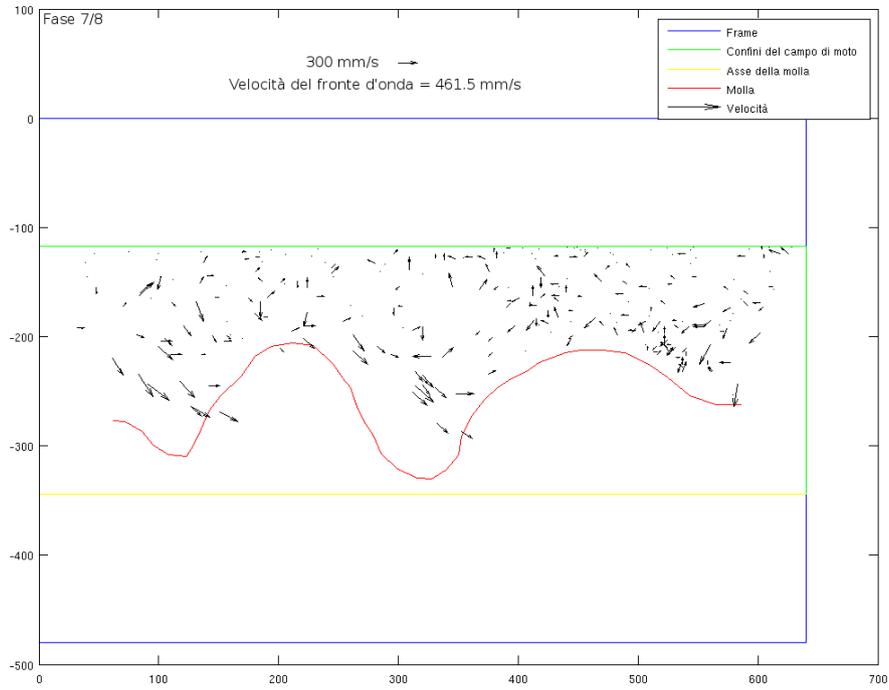


Figura 4.34: Campo di moto con molla “Free” - Fase 7/8.

Parte del campo di moto	u	v
Totale	$5.8mm/s$	$-17.4mm/s$
Superiore	$-13.4mm/s$	$0.0mm/s$
Inferiore	$64.7mm/s$	$-70.8mm/s$
Parte del campo di moto	u RMS	v RMS
Totale	$95.0mm/s$	$105.9mm/s$
Superiore	$71.6mm/s$	$85.3mm/s$
Inferiore	$144.8mm/s$	$152.8mm/s$

Tabella 4.31: Velocità campo di moto con molla “Free” - Fase 7/8.

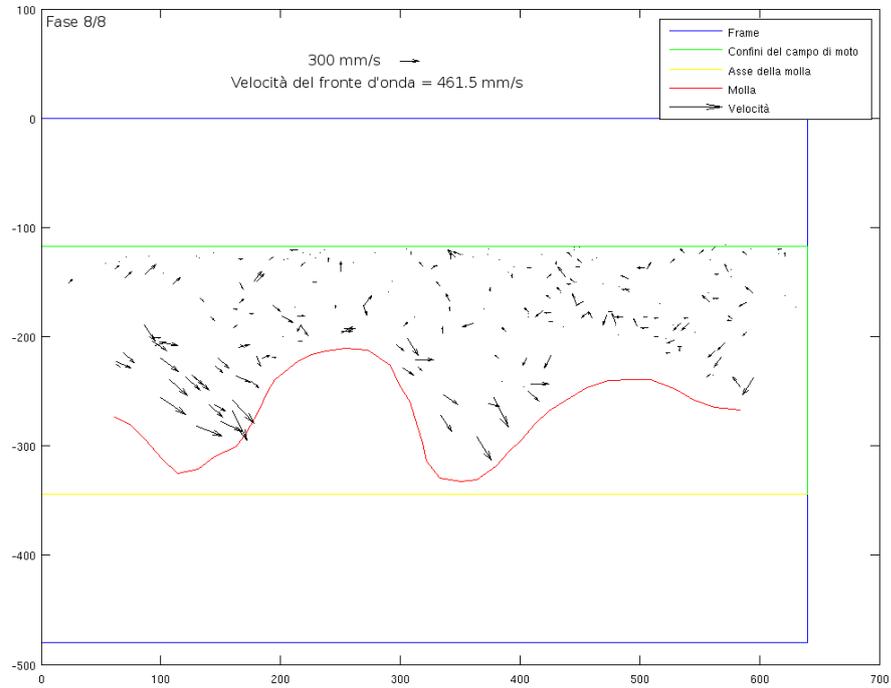


Figura 4.35: Campo di moto con molla “Free” - Fase 8/8.

Parte del campo di moto	u	v
Totale	25.3mm/s	-23.0mm/s
Superiore	-7.9mm/s	14.3mm/s
Inferiore	114.4mm/s	-123.1mm/s
Parte del campo di moto	u RMS	v RMS
Totale	112.7mm/s	113.8mm/s
Superiore	68.1mm/s	71.0mm/s
Inferiore	185.3mm/s	184.9mm/s

Tabella 4.32: Velocità campo di moto con molla “Free” - Fase 8/8.

Capitolo 5

Conclusioni e sviluppi futuri

5.1 Conclusioni

Si è riusciti nell'intento di progettare e costruire un macchinario adatto allo svolgimento di prove sperimentali su un mixer.

Inoltre dalle prime prove svolte si sono ottenuti risultati interessanti e confortanti per quanto riguarda un'eventuale possibilità di miglioramento del processo di mescolamento. Infatti le misure di coppia hanno mostrato una diminuzione rilevante della coppia necessaria in configurazione molla "Free".

Ciò è un buon inizio, ma non basta però per stabilire la bontà del comportamento di un siffatto dispositivo.

Infatti per raggiungere l'obbiettivo di apportare un miglioramento allo strumento, la riduzione di coppia non deve essere accompagnata anche da una riduzione di mescolamento o al limite può esserci una leggera flessione nell'efficacia del mixing, comunque minore rispetto ai vantaggi.

Da questo punto di vista sono però confortanti i risultati ottenuti dall'analisi del campo di moto intorno al dispositivo.

Infatti la configurazione "Free" rispetto a quella "Fixed" lascia intravedere la possibilità dell'esistenza di un flusso non trascurabile verso l'asse del dispositivo, attraverso le spire della molla, cosa che invece non appare, o appare in maniera molto ridotta nel caso di molla "Fixed".

Questo supposto comportamento, che non è stato possibile analizzare con gli strumenti utilizzati, è sicuramente benefico per il miscelamento, non contrapponendosi ad esso, anzi aiutandolo.

Ciò lascia presagire un comportamento interessante da analizzare e lascia spazio a sorprendenti conclusioni.

5.2 Sviluppi futuri

Dagli esperimenti effettuati si intravedono dei risultati interessanti che potrebbero condurre a qualcosa di più significativo se lo studio verrà portato avanti più nel dettaglio.

Sicuramente tra le cose da fare c'è un miglioramento della tecnica per le visualizzazioni di campo di moto, eventualmente in 3D, in modo da riuscire a comprendere cosa succede al

di fuori del piano e tra le spire della molla.

Un altro punto da sviluppare è quello che riguarda la quantificazione del mescolamento: è importante, anche se non triviale, trovare un modo, un indicatore di prestazione, che possa fornire informazioni quantitative sul miscelamento, in modo da riuscire a fare dei confronti tra le configurazioni differenti e capire davvero se ci possano essere dei vantaggi nell'utilizzo di un dispositivo come quello oggetto della tesi o qualche suo adattamento.

Metodi utilizzabili sia per migliorare la qualità della visualizzazione del campo di moto sia per dare un'idea delle prestazioni del mixer potrebbero essere:

- Traccianti colorati - la difficoltà maggiore sarebbe riuscire a cogliere qualche linea di flusso prima che la diffusione complichino le cose; per far ciò bisognerebbe utilizzare una telecamera ad alta velocità e studiare un modo per inserire il colorante puntualmente; entrambi i requisiti sono abbastanza stringenti.
- Equilibrio termico - si può creare un gradiente di temperatura stabile con ad esempio resistenza elettrica e cella di Peltier e misurare, con l'ausilio di termocoppie, il tempo necessario per arrivare ad equilibrio; tempo che sarebbe l'indice di prestazione.
- Mix-norm del campo di concentrazioni ad un tempo finale T_f al variare di un certo numero di condizioni significative - si definisce la mix-norm a partire dalla media del campo di concentrazioni [7] e si utilizza come indice di prestazione. Le condizioni significative, così come i tempi dell'esperimento vengono scelti tenendo in conto l'efficienza di stiramento, lo spessore della stratificazione e il rateo di ripiegamento [6].
- Mapping iterativo ed Esponente di Lyapunov - sono metodi basati sulla mappatura delle traiettorie delle particelle e sull'osservazione di regioni caotiche (buon mixing) o quasi periodiche (cattivo mixing) [3].
- Misure statistiche - basate sul risultato finale piuttosto che sull'evoluzione delle traiettorie [3].
- Altri metodi che prevedano il calcolo di un tempo caratteristico che serva da indicatore di prestazione.

Bibliografia

- [1] Y. Surpin, B. Sandler. *Elastic in tube propelling device (innovative design)*. International Journal of Mechanics and Material in Design 5: 243–252, 2009.
- [2] C. Tropea, A. L. Yarin, J. F. Foss. *Springer Handbook of Experimental Fluid Mechanics*. Springer, 2007.
- [3] M. D. Finn, S. M. Cox, H. M. Byrne. *Mixing measures for a two-dimensional chaotic Stokes flow*. Journal of Engineering Mathematics 48: 129–155, 2004.
- [4] J. Aubin, M. Ferrando, V. Jiricny. *Current methods for characterising mixing and flow in microchannels*. Chemical Engineering Science 65: 2065–2093, 2010.
- [5] F. De Somer, L. Foubert, M. Vanackere, D. Dujardin, J. Delanghe, G. Van Nooten. *Impact of oxygenator design on hemolysis, shear stress, and white blood cell and platelet counts*. Journal of Cardiothoracic and Vascular Anesthesia 10(7): 837-998, Dec. 1996.
- [6] O. Gubanov, L. Cortelezzi. *Towards the design of an optimal mixer*. Journal of Fluid Mechanics 651: 27-53, 2010.
- [7] L. Cortelezzi, A. Adrover, M. Giona. *Feasibility, efficiency and transportability of short-horizon optimal mixing protocols*. Journal of Fluid Mechanics 597: 199-231, 2008.
- [8] C. Habchi, D. Della Valle, T. Lemenand, Z. Anxionnaz, P. Tochon, M. Cabassud, C. Gourdon, H. Peerhossaini. *A new adaptive procedure for using chemical probes to characterize mixing*. Chemical Engineering Science 66: 3540-3550, 2011.
- [9] J. Kourunen, R. Käykhö, J. Matula, J. Käykhö, M. Vauhkonen, L. M. Heikkinen. *Imaging of mixing of two miscible liquids using electrical impedance tomography and linear impedance sensor*. Flow Measurement and Instrumentation 19: 391-396, 2008.
- [10] F. J. Muzzio, C. Meneveau, P. D. Swanson, J. M. Ottino. *Scaling and multifractal properties of mixing in chaotic flows*. Physics of Fluids 4(7): 1439-1456, July 1992.
- [11] T. Lemenand, P. Dupont, D. Della Valle, H. Peerhossaini. *Turbulent Mixing of Two Immiscible Fluids*. Journal of Fluids Engineering 127(6): 1132-1137, Nov. 2005.
- [12] T. Ferreira, W. Rasband. *ImageJ User Guide*. 2011.

