

SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE - DIN

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA MECCANICA

TESI DI LAUREA

in

Meccanica delle macchine

**PROGETTAZIONE E VALIDAZIONE DI TRAIETTORIE
ANTI-SLOSHING PER MACCHINE RIEMPITRICI IN
AMBIENTE ASETTICO**

CANDIDATO:
Filippo Brasina

RELATORE:
Prof. Ing. Marco Carricato

CORRELATORI:
PhD. Roberto Di Leva
Ing. Marco Grigolato
Ing. Lorenzo Cardillo

Anno accademico 2022/2023

Sessione IV



This work is licensed under the Creative Common
Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0).

To view a copy of this license, visit
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/legalcode>

Sommario

L'argomento trattato in questa tesi riguarda lo *sloshing*, ovvero il moto di un liquido all'interno di un contenitore, anch'esso in movimento. In particolare, il pelo libero è eccitato dall'accelerazione a cui è soggetto il recipiente. Questo fenomeno è stato analizzato su una macchina riempitrice automatica, prodotta da IMA, progettata per elaborare flaconi contenenti liquido farmaceutico in cui lo sloshing comporta diverse problematiche.

L'obiettivo è evitare la fuoriuscita del liquido dai flaconi durante la fase di avanzamento e migliorare l'accuratezza del controllo peso. Quest'ultima è particolarmente influenzata da un errore di pesatura significativo, principalmente dovuto alle oscillazioni del liquido durante la fase di sosta.

Con tale scopo, dopo aver studiato lo sloshing dal punto di vista teorico, sono state generate delle traiettorie anti-sloshing, applicando il metodo dell'*input shaping* alle leggi di moto che seguono i flaconi durante l'avanzamento.

In primo luogo, le traiettorie anti-sloshing sono state esaminate tramite analisi CFD, i cui risultati sono stati confrontati con quelli del modello meccanico equivalente proposto in letteratura.

Successivamente, sono stati condotti dei test sperimentali preliminari sulla macchina oggetto di questo lavoro per validare l'efficacia di tali traiettorie, con particolare attenzione all'analisi del controllo peso. Per concludere, sono state valutate delle leggi di moto definite a tratti, caratterizzate da una durata dei segmenti ottimizzata, in modo tale da rispettare specifici vincoli, al fine di minimizzare lo sloshing.

Indice

Sommario	5
1 Introduzione	9
2 Panoramica della macchina SMART 300	11
2.1 Funzionamento della macchina SMART 300	12
2.2 Stato dell'arte dell'avanzamento flaconi	15
2.3 Flaconi studiati	16
3 Sloshing	19
3.1 Sloshing nella macchina SMART 300	20
3.2 Modello teorico dello sloshing	20
3.2.1 Implementazione del modello MSD su MATLAB	23
3.2.2 Forze ricavate dal modello MSD	25
4 Generazione di traiettorie anti-sloshing con metodi di <i>input shaping</i>	27
4.1 Input Shaping	27
4.2 Traiettorie utilizzate	30
4.3 Applicazione dell' <i>input shaping</i> al caso dello sloshing	33
5 Analisi CFD	37
5.1 Impostazione delle simulazioni CFD	38
5.2 Risultati delle analisi CFD	41
5.3 Comparazione dei dati ottenuti da MATLAB e da CFD	43
6 Test sperimentali delle traiettorie anti-sloshing	49
6.1 Risultati per il flacone D46	50
6.2 Risultati per il flacone D49	52
7 Ottimizzazione di una legge definita a tratti	55
7.1 Traiettorie generate tramite ottimizzazione	57
8 Conclusioni	61
A Scheda tecnica bilancia Wipotec SL-M 250/300-FS	63
Ringraziamenti	65

Capitolo 1

Introduzione

In questo studio, svolto presso la divisione *Life* di IMA¹, viene trattato il fenomeno dello *sloshing*. Con il termine *sloshing*, ci si riferisce al moto di un liquido all'interno di un contenitore, anch'esso in movimento. Il fenomeno dello *sloshing* viene affrontato in diversi campi. Nell'ambito *automotive* e logistico, lo studio del moto dei carburanti all'interno di autocisterne, petroliere, metaniere o dei serbatoi di aerei ed autocarri, viene svolto per valutare le forze che si scambiano all'interno dei serbatoi stessi, al fine di progettarli in sicurezza. A livello industriale, nelle macchine automatiche riempitrici di liquidi farmaceutici e alimentari, lo *sloshing* deve essere limitato il più possibile per evitare fuoriuscite indesiderate, al tempo stesso garantendo una produttività elevata. È proprio in quest'ultimo ambito che si inserisce il lavoro di tesi svolto, dove la macchina riempitrice automatica *SMART 300* progettata da IMA *Life* per il settore farmaceutico, è caratterizzata da un'elevata produttività, il che comporta elevate accelerazioni a cui sono soggetti i flaconi e il liquido al loro interno.

Le prestazioni di una macchina automatica sono principalmente quantificate in termini di prodotti processati in una certa unità di tempo ed di accuratezza del prodotto dosato, ed IMA è regolarmente impegnata nel migliorare questi due aspetti. In questo contesto, lo *sloshing* è quindi un fenomeno altamente indesiderato in quanto l'oscillazione del fluido può causare errori di pesatura durante la fase di controllo peso, residui di liquido sulle pareti del flacone (da evitare dal punto di vista estetico), e, in caso di accelerazioni particolarmente elevate, si può avere anche la fuoriuscita di liquido dal flacone stesso. Specialmente nel settore farmaceutico, è cruciale evitare queste problematiche, considerando che i prodotti elaborati possono essere molto costosi, e si deve minimizzare la produzione scarti.

L'obiettivo finale di questa tesi è quindi migliorare le prestazioni della macchina, riducendo al minimo il fenomeno dello *sloshing*.

A tal proposito, nel Capitolo 2 viene introdotta la macchina oggetto di questo lavoro, con una panoramica generale sul suo funzionamento, soffermandosi sul sistema di avanzamento dei flaconi e la logica di controllo basata sui gradi macchina.

Nel Capitolo 3, viene approfondito lo *sloshing* dal punto di vista teorico e si evidenzia l'indesiderabilità di questo fenomeno in questo contesto di studio. Viene introdotto un modello teorico dello *sloshing*, basato sul concetto di massa-molla-smorzatore già esistente in letteratura [1]. Una volta implementato su MATLAB un programma per l'analisi di questo modello, seguendo quanto scritto in [2] e [3], è stato possibile calcolare l'altezza di *sloshing* e le forze in gioco durante il moto dovute al liquido nel flacone.

¹<https://ima.it/it/>

Successivamente, nel Capitolo 4 si affronta la generazione di traiettorie anti-sloshing, con l'applicazione del metodo *input shaping*, descritto in [4]. Tale metodo permette di ottenere la cancellazione delle vibrazioni residue in un sistema massa-molla-smorzatore, con la sola modifica della forzante. Come riportato in [5], applicando l'*input shaping*, è possibile ridurre le oscillazioni residue del liquido a seguito del moto del flacone.

Il Capitolo 5 si concentra sul processo di simulazione CFD di queste traiettorie, inizialmente effettuate per verificare il comportamento del liquido. Inoltre, grazie ai risultati di tali simulazioni, è stato possibile confrontare il modello MATLAB con quello CFD, mettendo in luce similitudini tra di essi.

In seguito, sono stati condotti dei test sperimentali sulla macchina *SMART 300* per le traiettorie anti-sloshing generate tramite *input shaping*. I risultati di questi test, presentati nel Capitolo 6, includono un'analisi approfondita degli errori di pesatura ricavati grazie alle bilance del controllo peso, al fine di valutare l'efficacia di tali leggi.

Nel Capitolo 7 viene descritto un ulteriore metodo per vincolare il comportamento del liquido nel flacone attraverso l'ottimizzazione di una legge definita a tratti. Quest'approccio si propone di minimizzare l'altezza di sloshing o di mantenerla entro un range prestabilito. Attraverso l'utilizzo di un programma MATLAB, è stato definito un metodo per calcolare le durate ottimali dei vari tratti da cui è composta la legge, assicurando il rispetto di vincoli specifici. Nel contesto delle macchine automatiche, tale approccio è particolarmente agevole da implementare. È possibile ottenere una legge di controllo dello sloshing efficace semplicemente regolando la durata dei singoli tratti, evitando altri tipi di modifiche sulla traiettoria.

Infine, nel Capitolo 8 si traggono le conclusioni sul lavoro svolto e si offrono spunti per lavori futuri.

Capitolo 2

Panoramica della macchina *SMART 300*



Figura 2.1: Macchina *SMART 300*.

IMA è un'azienda leader mondiale nella progettazione e produzione di macchine automatiche per il processo e il confezionamento di prodotti farmaceutici, cosmetici e alimentari. È composta da diverse divisioni, ciascuna operante su una certa categoria di prodotto.

La divisione IMA *Life* è specializzata in linee di processo in ambiente asettico, caratteristica di fondamentale importanza per l'elaborazione di prodotti farmaceutici. Tale reparto offre macchine per il lavaggio e la sterilizzazione di flaconi farmaceutici, sistemi di riempimento e chiusura per ambiente asettico di flaconi, fiale e siringhe, RABS (*Restricted Access Barrier System*) ed isolatori, dosatrici per polveri ed impianti di liofilizzazione industriali che possono essere abbinati a una vasta gamma di sistemi di carico e scarico automatizzati.

Questo studio è stato svolto all'interno della sede *Life* a Castel San Pietro (BO), sulla macchina denominata *SMART 300* (visibile in Figura 2.1), specifica per riempimento, chiusura e tappatura di flaconi contenuti liquido in ambiente asettico. È adatta alla pro-

duzione di lotti medio-grandi, può elaborare una vasta gamma di flaconi ed è in grado di raggiungere le 300 unità prodotto al minuto.

2.1 Funzionamento della macchina *SMART 300*



Figura 2.2: Sistema di movimentazione con pettine e sistema dosaggio tramite ugelli.

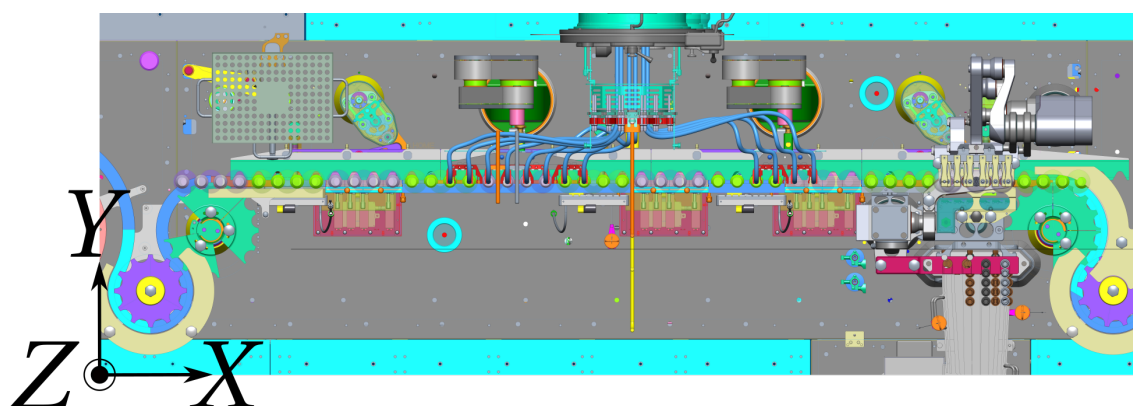


Figura 2.3: Layout in pianta della macchina *SMART 300*, in cui si possono osservare i vari membri. É anche presente il sistema di riferimento con gli assi X,Y e Z.

La *SMART 300* è progettata per poter gestire in totale autonomia il dosaggio, la pesatura e la tappatura del flacone. Il sistema è idoneo all'uso in camera sterile e può essere eventualmente predisposto per l'uso sotto isolatore. Per soddisfare tale necessità, tutti i materiali e componenti utilizzati sono compatibili con gli agenti sterilizzanti e idonei all'esposizione a VHP (perossido di idrogeno vaporizzato). Le procedure di sterilizzazione supportate sono CIP (*Clean In Place*) e SIP (*Sterilising In Place*). Questi metodi consentono la pulizia e la sterilizzazione senza la necessità di smontare l'impianto.

Per quanto riguarda il sistema di controllo peso, la macchina può essere configurata in



Figura 2.4: Alimentazione flaconi, a sinistra la giostra rotante e a destra la stella a settori.

modo da garantire il controllo di tutti i flaconi processati, al fine di ottenere il 100% *In-Process Control* (IPC) o, alternativamente, effettuare un controllo peso statistico che esamina il peso di parte dei flaconi mediante varie strategie di campionamento. Per quanto riguarda il sistema di trasporto, la macchina presenta una movimentazione intermittente, in quanto durante la fase di sosta avvengono sia il dosaggio sia il controllo peso. La movimentazione dei flaconi avviene grazie ad un pettine, avente avanzamento fisso di $A \left[\frac{mm}{ciclo} \right]$, che si accoppia a singoli flaconi e li trascina in avanti con un moto rettilineo. Al termine dell'avanzamento il pettine si disaccoppia dai flaconi e nella fase di ritorno si riporta nella posizione iniziale per iniziare un nuovo ciclo. Il pettine (Figura 2.2) si muove su un piano parallelo al piano XY (Figura 2.3), ed è montato su una barra, a sua volta movimentata ai suoi estremi da due bracci planari. Questi ultimi sono dotati di due coppie rotoidali ($2R$), aventi quindi due gradi di libertà. Tali bracci compiono le stesse traiettorie, poiché sono gestiti dallo stesso motore tramite un sistema di tiranti che garantiscono precisione nel moto d'avanzamento, dato che la lunghezza del pettine supera normalmente i 2 metri.

I flaconi vuoti e pronti per essere riempiti sono accumulati in una tavola rotante che funge da *buffer*, cioè da accumulatore. Successivamente giungono ad una giostra rotante (Figura 2.4) che distanzia i flaconi mettendoli al passo. Per passare dal moto continuo della giostra a quello intermittente del pettine si utilizza una stella a 3 settori (Figura 2.4), ciascuno gestito da un proprio motore. Tale sistema si avrà anche in uscita dal pettine, in maniera invertita (stella a settori seguita dalla giostra rotante) per portare i flaconi riempiti alla successiva stazione di tappatura. Passando alle tipologie di dosaggi possibili, la macchina SMART 300 può essere configurata per il riempimento di liquidi tramite pompe peristaltiche oppure con pompe differenziali. Le prime sono preferite per la maggior accuratezza e la miglior stabilità nel mantenimento della goccia. In entrambi i casi, il liquido arriva tramite tubi agli ugelli di riempimento, montati su un braccio che con moto traslatorio verticale (lungo Z) regola la loro posizione all'interno dei flaconi durante il dosaggio (Figura 2.5).

La macchina presenta due stazioni di dosaggio (in Figura 2.5 si può notare in dettaglio



Figura 2.5: Dettaglio del riempimento dei flaconi.



Figura 2.6: Giostra di tappatura.

una stazione), in modo tale da avere un primo riempimento più grossolano (in genere dal 70% al 90% del riempimento totale), seguito da un secondo ed ultimo riempimento più fine, effettuato con ugelli aventi diametro minore, così da avere il dosaggio più preciso possibile. Vengono riempiti contemporaneamente gruppi di 2, 4 o 6 flaconi, a seconda della configurazione impostata. Da evidenziare il fatto che il pettine che movimentata i flaconi è sempre lo stesso per entrambe le stazioni di riempimento. Lungo la macchina sono presenti una serie di stazioni di controllo peso, prima e dopo ogni gruppo di dosaggio in modo da poter monitorare, effettuando la differenza tra lordo e tara, il netto aggiunto da ogni dosatore. Per due stazioni di dosaggio saranno quindi presenti 3 stazioni di controllo peso, tutte disposte lungo l'asse di trasporto della macchina. Se il valore di peso ottenuto per il liquido dosato è considerato accettabile per le prestazioni richieste, allora il flacone prosegue il percorso nelle stazioni successive, altrimenti può essere scartato in caso di sovradosaggio, mentre in caso di sottodosaggio la macchina entra in uno stato di fermo in cui si effettua il dosaggio mancante, grazie a un braccio che interviene direttamente al di sopra della stazione di controllo peso.

Una volta che i flaconi sono stati correttamente riempiti, giungono alla giostra di tappatura (Figura 2.6), alimentata da una stazione di accumulo vibrante specifica per i tappi. La *SMART 300*, essendo una macchina molto versatile, permette di elaborare una grande varietà di flaconi, da un diametro minimo di 16 mm fino a un diametro

massimo di 88 mm. A seconda del diametro flacone che si sta processando, è necessario sostituire tutte le parti di riscontro flaconi, come il pettine, le giostre rotanti, i settori delle stelle e le varie guide. Tali componenti, distinguibili dal colore nero nelle figure precedenti, sono realizzati in POM-C, una resina acetaleica di polioossimetilene caratterizzata da un'ottima durezza e rigidità, ottima resistenza ad oli e solventi, buona stabilità dimensionale, basso coefficiente d'attrito e ottima resistenza all'abrasione. Per condurre questo studio, è stato impiegato un muletto della macchina *SMART 300* presente in azienda. Questo muletto è essenzialmente una macchina simile a quelle già vendute ai clienti ed è utilizzato come banco prova per apportare miglioramenti o risolvere eventuali problemi. Inoltre, poiché i prodotti farmaceutici utilizzati dai clienti non sono disponibili per effettuare dei test, si è utilizzata semplice acqua per effettuare le varie prove.

2.2 Stato dell'arte dell'avanzamento flaconi

La logica di controllo della macchina *SMART 300* si basa sui gradi macchina (da 0 a 360°, vengono azzerati ad ogni ciclo) e si basa sulla ciclica impostata (il numero di cicli effettuati in un minuto). Tale ciclica C è espressa in $\frac{\text{cicli}}{\text{min}}$ e dipende principalmente dal riempimento richiesto, in quanto maggiore sarà il riempimento, maggiore sarà il tempo richiesto per il dosaggio, e quindi si avranno meno cicli al minuto. La ciclica può essere variata a seconda del lotto in produzione tramite pannello HMI (*Human Machine Interface*) della macchina. Come menzionato precedentemente, la macchina ha una movimentazione intermittente, perciò si avrà a disposizione un numero di gradi pari a θ per la fase di avanzamento, e $(360^\circ - \theta)$ per la fase di sosta.

I gradi a disposizione per la sosta sono fortemente vincolati, in quanto sono necessari per il corretto dosaggio, per la pesatura dei flaconi che si trovano sulle stazioni di controllo peso, per l'elaborazione di tale dati e la valutazione degli eventuali sovradosaggi o sottodosaggi, per i quali è richiesto anche l'intervento della macchina per effettuare il riempimento mancante.

Fatte queste prime valutazioni, possono essere ricavati i primi dati utili:

$$\text{Tempo ciclo : } T_c = \frac{60}{C} \left[\frac{\text{s}}{\text{ciclo}} \right] \quad (2.1)$$

$$\text{Tempo avanzamento : } T_a = \frac{\theta}{360} \cdot T_c \left[\frac{\text{s}}{\text{ciclo}} \right] \quad (2.2)$$

$$\text{Tempo sosta : } T_s = \frac{(360 - \theta)}{360} \cdot T_c \left[\frac{\text{s}}{\text{ciclo}} \right] \quad (2.3)$$

Da ciò deriva che l'avanzamento A del pettine, avente a disposizione θ gradi macchina, dev'essere completato in un tempo pari a T_a , mentre il ritorno alla posizione iniziale deve avvenire in un tempo T_s . Come già menzionato nella Sezione 2.1, il pettine si muove in piano parallelo al piano XY , perciò il suo moto è ottenuto dalla combinazione di due traiettorie, una lungo X e una lungo Y . Il movimento è ricostruito tramite la cinematica inversa del braccio che muove tale componente.

La componente d'interesse per l'avanzamento dei flaconi è solamente quella lungo X , e non si tratterà di quella lungo Y . La legge di moto standard assegnata al pettine, lungo X , è una trapezoidale modificata. In Figura 2.7 sono presentati i grafici relativi a posizione, velocità, accelerazione e jerk rispetto ai gradi macchina, in cui tutti i dati sono

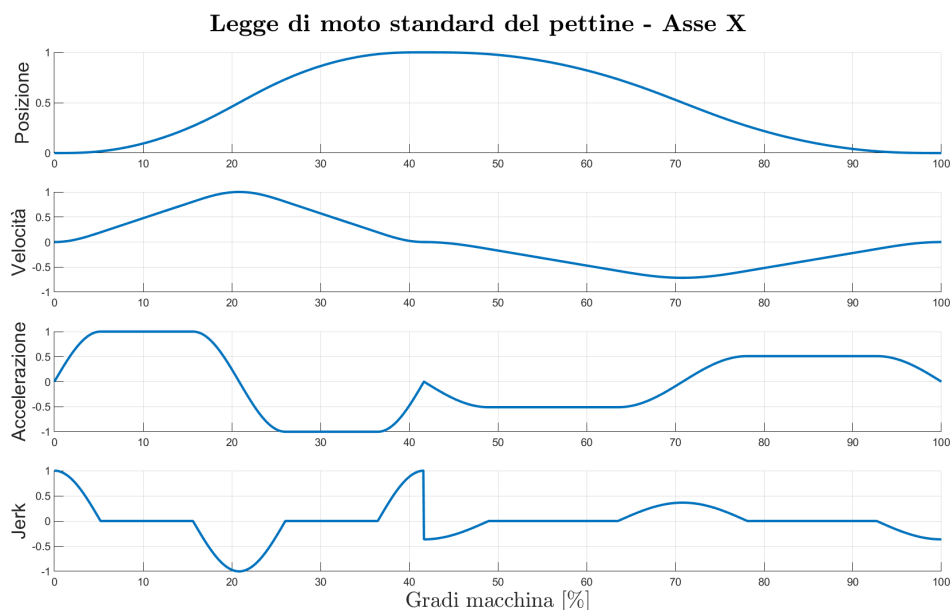


Figura 2.7: Grafici normalizzati relativi alla legge di moto standard del pettine per un ciclo, lungo l'asse X.

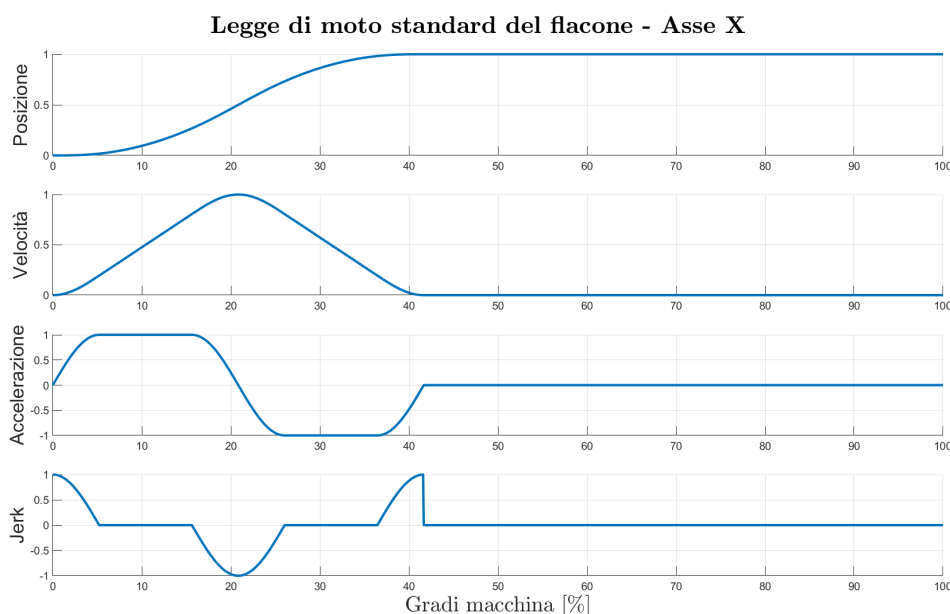


Figura 2.8: Grafici normalizzati relativi alla legge di moto standard del flacone per un ciclo, lungo l'asse X.

stati normalizzati rispetto al loro valore massimo. È possibile osservare un primo tratto, relativo alla fase di andata, e un secondo tratto, più lungo, in cui il pettine compie la fase di ritorno. Dato che il flacone è accoppiato al pettine solamente durante la fase di avanzamento di quest'ultimo, presenterà una legge di moto in cui il secondo tratto è costituito da una sosta, come presentato in Figura 2.8.

2.3 Flaconi studiati

I flaconi che possono essere elaborati dalla SMART 300 hanno un range di diametro molto ampio. Durante questo studio è stato preso in esame un numero limitato

di flaconi in vetro, tutti conformi alle norme DIN di *tipo 1*, aventi le caratteristiche presentate nella Tabella 2.1.



Figura 2.9: A sinistra il flacone D46 e a destra il flacone D49.

Flaconi			
Riempimento nominale flacone [ml]	Diametro esterno [mm]	Diametro interno [mm]	Altezza del flacone [mm]
50	46	39.5	68
100	49	42.5	104

Tabella 2.1: Caratteristiche principali dei flaconi.

I flaconi sono visibili in Figura 2.9, e per richiamarli si fa riferimento al diametro esterno, identificandoli come D46 e D49.

Ogni flacone ha una ciclica massima a cui può essere elaborato, vincolo principalmente determinato dal tempo necessario per il riempimento. Quindi maggiore sarà il riempimento, minore sarà la ciclica. In Tabella 2.2, sono riportate le varie cicliche massime.

Cicliche	
Flacone	Ciclica [$\frac{\text{cicli}}{\text{min}}$]
D46	C_1
D49	C_2 (70% di C_1)

Tabella 2.2: Tabella con le cicliche massime dei flaconi studiati.

Ovviamente, ogni tipo di flacone può essere elaborato ad una ciclica anche inferiore a quella riportata.

Come detto nella Sezione 2.1, il dosaggio dei flaconi è frazionato in due stazioni, in particolare si ha:

- Flacone D46: riempimento parziale a 45 ml e totale a 50 ml;
- Flacone D49: riempimento parziale a 70 ml e totale a 100 ml.

Capitolo 3

Sloshing

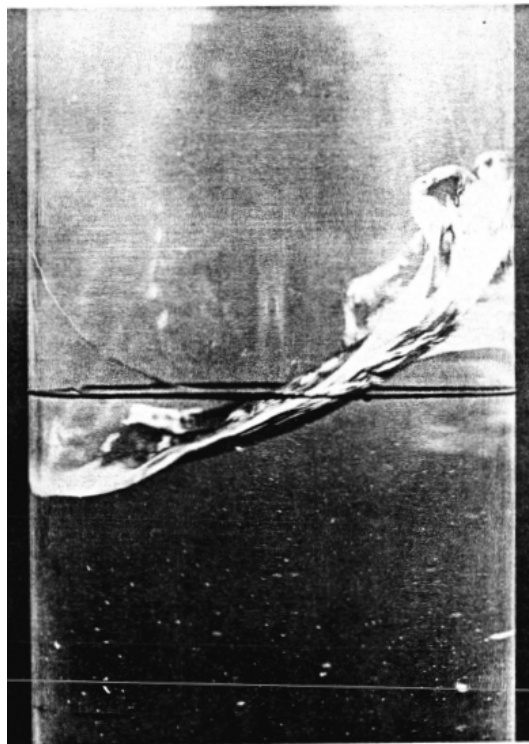


Figura 3.1: Oscillazione del liquido in movimento in un recipiente cilindrico, da [6].

Per sloshing s'intende il movimento di un liquido all'interno di un contenitore, anch'esso in movimento. In particolare, la superficie libera del liquido cerca di raggiungere uno stato di equilibrio a seguito dell'accelerazione a cui è soggetta il recipiente, come visibile in Figura 3.1. La quantità di moto che il fluido possiede porta alla generazione di carichi sul contenitore o su altri componenti all'interno del contenitore stesso, con conseguente influenza sulla stabilità dinamica dell'insieme. Inoltre, in caso di recipiente aperto, si potrebbe avere anche la fuoriuscita del liquido da esso. Questo fenomeno può essere osservato in vari campi, ad esempio un'esperienza che tutti abbiamo è il trasporto di una tazza contenente del tè, che dev'essere movimentata con cautela per evitare schizzi. Altri casi si verificano in serbatoi per lo stoccaggio di liquidi soggetti a fenomeni sismici, in cisterne in movimento, come ad esempio in autocisterne (Figura 3.2), navi petroliere e metaniere, e anche nei serbatoi degli aerei. Uno dei primi settori in cui è stato studiato lo sloshing è quello aerospaziale, in parti-



Figura 3.2: Simulazione CFD dello sloshing di un combustibile liquido all'interno di un'autocisterna, da [7]. Le forze e momenti idrodinamici causati dalle oscillazioni del liquido modificano la stabilità e il controllo del veicolo, soprattutto durante frenate o sterzate.

colare negli anni '60 dalla NASA (*National Aeronautics and Space Administration*), per l'analisi del comportamento del liquido in serbatoi per veicoli spaziali, come razzi e satelliti, dato che il movimento del propellente, soprattutto in condizioni di assenza di peso, influenza notevolmente la dinamica del sistema. Fatte queste prime osservazioni, risulta evidente che lo sloshing è un fenomeno altamente indesiderato, in quanto rende molto più complesso lo studio e il controllo di un sistema in cui è presente un liquido.

3.1 Sloshing nella macchina SMART 300

Nel settore delle macchine automatiche per il confezionamento di prodotti liquidi, in cui l'obiettivo è quello di minimizzare i tempi di riempimento e di trasporto, si hanno in molti casi delle accelerazioni molto spinte che possono portare a diversi problemi causati dallo sloshing.

Nella SMART 300 si vuole cercare di controllare, e possibilmente ridurre, tale fenomeno durante la fase d'avanzamento dei flaconi, descritta nella Sezione 2.2, in cui a seconda del flacone e del riempimento, sono emerse diverse problematiche.

Per il flacone D46 (Figura 3.3), con riempimento a 50 ml, si verificano le maggiori accelerazioni in quanto ha una ciclica C_1 maggiore. In questa situazione, il liquido raggiunge la bocca del flacone, zona in cui successivamente verrà inserito il tappo. Ciò può portare a una possibile contaminazione del prodotto farmaceutico. In alcuni casi, si arriva anche alla fuoriuscita di alcune gocce, da evitare per non avere spreco di prodotto.

Per il flacone D49 (Figura 3.4), con entrambi i riempimenti, alla ciclica C_2 , si vuole ridurre lo sloshing poiché comporta delle oscillazioni durante la fase di controllo peso, generando notevoli errori di peso rilevati dalle microbilance. Anche per il flacone D46, seppur in misura minore, è presente tale problema.

3.2 Modello teorico dello sloshing

Spesso nell'ambito ingegneristico si ha la necessità di far riferimento ad un modello meccanico equivalente, ovvero una rappresentazione semplificata di un sistema mec-

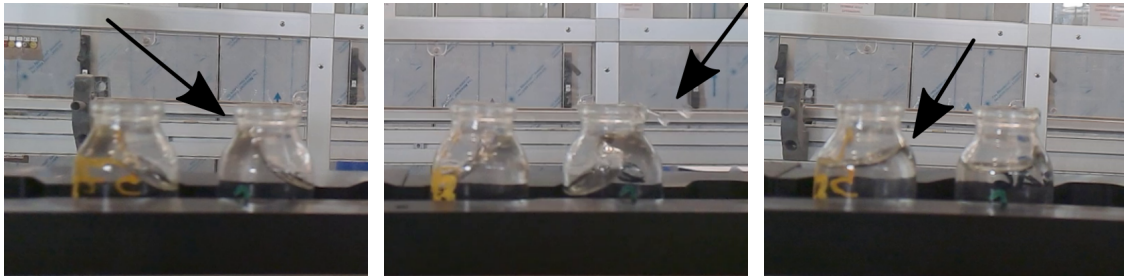


Figura 3.3: Sloshing nel flacone D46 con legge di moto standard, alla ciclica C_1 con riempimento a 50 ml. A sinistra la fase di accelerazione, dove si può notare che il liquido arriva alla bocca del flacone. Al centro la fase di decelerazione in cui si osserva la fuoriuscita di gocce. A destra, durante la fase di sosta, si può vedere l'oscillazione del liquido.

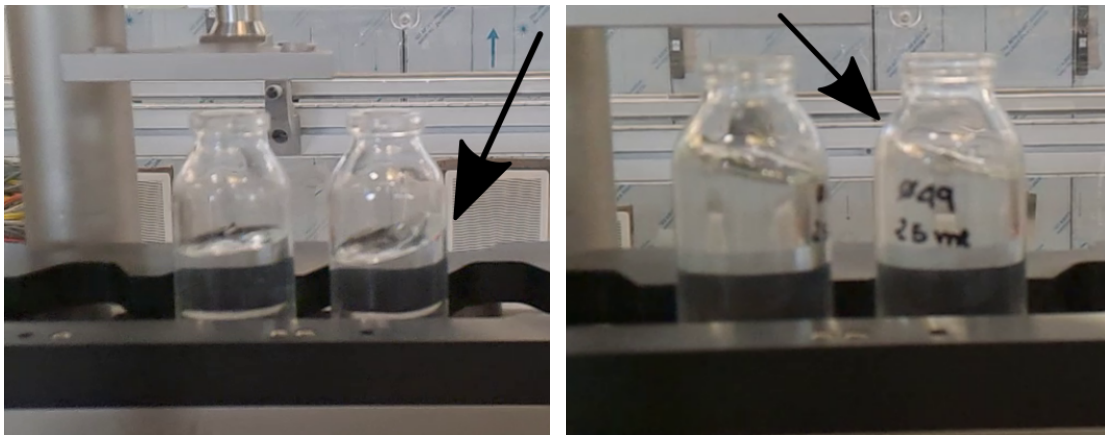


Figura 3.4: Sloshing nel flacone D49 durante la fase di sosta con legge di moto standard, alla ciclica C_2 : a sinistra con riempimento a 70 ml, mentre a destra con 100 ml.

canico complesso, che approssima il comportamento del sistema in modo da renderlo più gestibile per la sua analisi. Anche nel caso dello sloshing è possibile questo procedimento e, in letteratura [1], si hanno due modelli:

- Modello del pendolo (Figura 3.5);
- Modello massa-molla-smorzatore (Figura 3.6);

In questo caso di studio, si possono fare alcune semplificazioni, in quanto il moto è planare (spostamento unidirezionale lungo l'asse X) e i contenitori utilizzati hanno una forma prevalentemente cilindrica.

Entrambi i modelli prevedono la presenza di una massa fissa m_0 nella parte inferiore del recipiente e un numero n di masse soggette allo sloshing, indicate con m_n .

È stato adottato il modello massa-molla-smorzatore (che verrà abbreviato con *MSD*, dall'inglese *mass-spring-damper*), come descritto in [2]. Questo modello è stato preferito al pendolo per la sua maggiore accuratezza, soprattutto nelle situazioni di elevate accelerazioni del contenitore. Nel modello MSD le masse m_n sono collegate al contenitore con molle aventi rigidezza k_n e con smorzatori aventi coefficienti di smorzamento c_n .

Dall'analisi della risposta omogenea del modello continuo si ottengono i modi di sloshing, e quindi la frequenza naturale ω associata al generico modo mn per un reci-

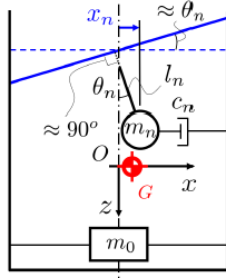


Figura 3.5: Modello del pendolo.

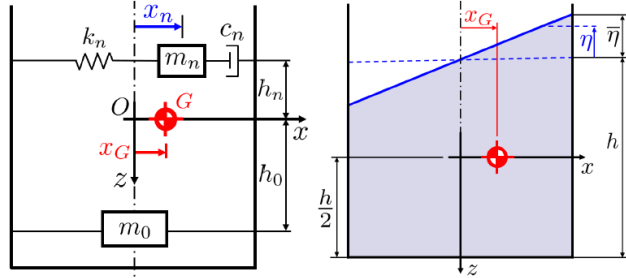


Figura 3.6: Modello massa-molla-smorzatore.

piante cilindrico è:

$$\omega_{mn} = \sqrt{\frac{g\xi_{mn}}{R} \tanh\left(\frac{\xi_{mn}h}{R}\right)} \quad (3.1)$$

Il pedice m rappresenta i modi circolari, mentre n quelli radiali. I termini presenti nell'equazione (3.1) sono i seguenti:

- g : accelerazione di gravità $\left[\frac{m}{s^2}\right]$
- ξ_{mn} : radice della derivata della funzione di Bessel, rispetto alla coordinata radiale r ;
- R : raggio del contenitore cilindrico [m];
- h : altezza di riempimento [m];

I valori di ξ_{mn} sono tabulati in [8]. Un altro effetto, dovuto maggiormente alla viscosità del liquido, è il fattore di smorzamento, che per il generico modo radiale n per un recipiente cilindrico è:

$$\zeta_n = 0.92 \sqrt{\frac{\mu/\rho}{\sqrt{gR^3}}} \cdot \left[1 + \frac{0.318}{\sinh(1.84h/R)} \left(1 + \frac{1-h/R}{\cosh(1.84h/R)} \right) \right] \quad (3.2)$$

in cui:

- ρ : densità del liquido $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$;
- μ : viscosità dinamica del liquido [Pa · s];

I modi circolari m maggiori di 1 sono sempre trascurabili, quindi si prenderanno in considerazione sempre e solo i modi radiali n e il pedice m presente nell'equazione (3.1) verrà sempre omesso.

Nel nostro caso, il contenitore si muove orizzontalmente lungo l'asse X , perciò il moto della massa m_n associata al generico modo radiale n è dato da:

$$\ddot{x}_n + 2\zeta_n\omega_n\dot{x}_n + \omega_n^2x_n = -\ddot{x}_0 \quad (3.3)$$

nella quale la frequenza naturale e il fattore di smorzamento sono dati dalle equazioni (3.1) e (3.2), rispettivamente. Il termine \ddot{x}_0 indica l'accelerazione del contenitore, e x_n lo spostamento della massa di sloshing m_n , come rappresentato in Figura 3.6.

Il valore dell' n -esima massa m_n è dato da:

$$m_n = \frac{2m_f R}{\xi_{1n} h (\xi_{1n}^2 - 1)} \tanh\left(\frac{\xi_{1n} h}{R}\right) \quad (3.4)$$

dove m_f è la massa totale del fluido in kg .

Nelle applicazioni pratiche anche i modi radiali maggiori del primo risultano spesso trascurabili, perciò si ha $m = 1$ e $n = 1$, e il modello si semplifica tramite l'utilizzo di una sola massa di sloshing m_1 .

I valori di ξ_{mn} sono tabulati (aggiungere fonte) e si ha:

$$\xi_{11} = 1.84118 \implies \omega_1 = \sqrt{\frac{g\xi_{11}}{R} \tanh\left(\frac{\xi_{11}h}{R}\right)} \quad (3.5)$$

e quindi l'equazione (3.3) diventa:

$$\ddot{x}_1 + 2\zeta_1\omega_1\dot{x}_1 + \omega_1^2x_1 = -\ddot{x}_0 \quad (3.6)$$

Risolvendo questa equazione differenziale, avendo in input l'accelerazione \ddot{x}_0 , si ottiene l'andamento della posizione x_1 nel tempo. Avendo a disposizione tale spostamento, è possibile calcolare l'altezza di sloshing sulla parete del contenitore, indicata in Figura 3.6 come $\bar{\eta}$. Per un recipiente cilindrico si ha la seguente:

$$\bar{\eta} = 8 \frac{x_1}{\xi_{11}(\xi_{11}^2 - 1)} \tanh\left(\frac{\xi_{11}h}{R}\right) \quad (3.7)$$

Da notare che tale altezza si riferisce alla parete del contenitore che, nel sistema di riferimento in Figura 3.6, ha coordinata X concorde in segno a quello della direzione di spostamento del recipiente (i.e., se il contenitore si muove a destra è la parete destra, se si muove a sinistra è la parete sinistra).

3.2.1 Implementazione del modello MSD su MATLAB

Per valutare l'altezza di sloshing data una certa accelerazione del flacone, è stato scritto un programma sul software MATLAB. Sono stati impostati i parametri principali del flacone e del liquido, ovvero:

- R: raggio interno del flacone (Tabella 2.1) [m];
- V: volume di riempimento [ml];
- h: altezza del pelo libero nella condizione di quiete (altezza di riempimento)
 $h = \frac{V \cdot 10^{-6}}{\pi R^2}$ [m];
- ρ : densità del liquido
 per acqua in condizioni standard $\rho = 997 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$;
- μ : viscosità del liquido
 per acqua in condizioni standard $\mu = 8.9 \cdot 10^{-4} [Pa \cdot s]$;

Avendo tutti i dati, è possibile risolvere l'equazione differenziale del moto (3.6). In particolare, si tratta di un'equazione differenziale lineare del secondo ordine a coefficienti costanti, perciò rappresenta un sistema lineare e tempo-invariante (sistema LTI).

Si è scelto quindi di utilizzare la funzione **lsim**(*sys*, *u*, *t*) di MATLAB, che restituisce la risposta nel tempo *t* di un sistema LTI *sys* (descritto tramite funzione di trasferimento) a un dato input *u*.

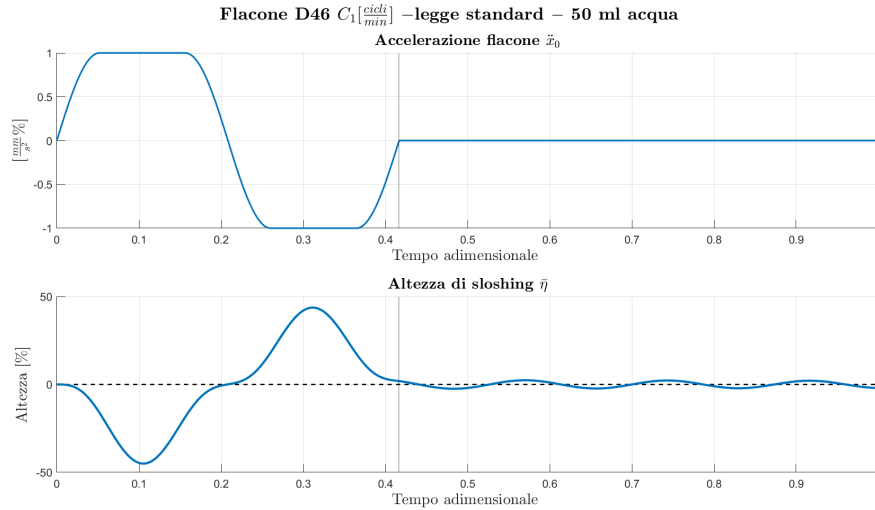


Figura 3.7: In alto il grafico dell’accelerazione, con legge standard data al flacone, riportata al valore suo valore massimo. In basso il grafico relativo all’altezza dello sloshing, riportata in percentuale rispetto all’altezza del pelo libero in condizioni stazionarie.

La funzione di trasferimento (abbreviata con FdT) permette di esprimere la relazione tra ingresso e uscita, nel dominio della frequenza, per un sistema LTI. Nel nostro caso l’ingresso è l’accelerazione del flacone \ddot{x}_0 , mentre l’uscita è la posizione x_1 . La trasformata di Laplace dell’equazione (3.6) è la seguente:

$$x_1 (s^2 + 2\zeta_n \omega_1 s + \omega_1^2) = -\ddot{x}_0 \quad (3.8)$$

dove s è la variabile complessa. Da qui è facilmente ricavabile la funzione di trasferimento G , data dal rapporto tra uscita e ingresso:

$$G(s) = \frac{x_1}{\ddot{x}_0} = \frac{-1}{s^2 + 2\zeta_n \omega_1 s + \omega_1^2} \quad (3.9)$$

Dati quindi alla funzione **lsim** la FdT G , l’accelerazione \ddot{x}_0 per un ciclo d’avanzamento, e il tempo discretizzato, che andrà da 0 a T_c (come descritto nella Sezione 2.2), si ottiene come output lo spostamento x_1 della massa di sloshing, per un completo ciclo macchina. L’altezza di sloshing $\bar{\eta}$ può essere poi calcolata con l’espressione (3.7). Il grafico di tale risultato, per il flacone D46 alla ciclica C_1 riempito con 50 ml, è visibile in Figura 3.7. In questo grafico e nei successivi, l’altezza di sloshing è riportata in percentuale, tramite la seguente espressione:

$$\text{Altezza di sloshing \%} = 100 \cdot \frac{\bar{\eta}}{h} \quad (3.10)$$

Tale operazione è stata effettuata per scopi di riservatezza aziendale. Durante la fase di accelerazione, l’altezza (sempre sulla parte destra del flacone) risulta diminuire rispetto la condizione statica, durante la fase di decelerazione l’altezza sale, e infine durante la fase di sosta si può notare l’oscillazione del liquido. Si è quindi simulato tramite modello semplificato la situazione vista in Figura 3.3.

3.2.2 Forze ricavate dal modello MSD

Oltre all'altezza di sloshing, il modello MSD consente anche di calcolare le forze generate durante il moto del flacone. Facendo riferimento alla Figura 3.6, le forze dovute allo sloshing del liquido sono state calcolate lungo la direzione Z , ovvero la direzione lungo cui agisce la forza peso, e lungo la direzione X . Da [3], si ha che la coordinata Z della massa di sloshing è data:

$$z_n = \frac{C_n}{2R}(x_n^2 + y_n^2) \quad \text{con} \quad C_n = \frac{\omega_1^2 R}{g} \quad (3.11)$$

Tale espressione vale anche per i moti bidirezionali, in quanto è presente anche la coordinata y_n della massa di sloshing. Nel nostro caso non si considererà tale coordinata in quanto è una situazione di moto unidirezionale. Inoltre, come riportato nella Sezione 3.2, si ricorda che $n = 1$ quindi $x_n = x_1$.

Derivando l'equazione (3.11) rispetto il tempo, possiamo ottenere la velocità \dot{z}_1 :

$$\dot{z}_1 = \frac{C_n}{R}(\dot{x}_1 x_1) \quad (3.12)$$

Derivando ulteriormente otteniamo l'accelerazione \ddot{z}_1 :

$$\ddot{z}_1 = \frac{C_n}{R}(\ddot{x}_1 x_1 + \dot{x}_1^2) \quad (3.13)$$

Per calcolare questa accelerazione è stato sufficiente calcolare \dot{x}_1 e \ddot{x}_1 tramite derivata numerica di x_1 .

La forza agente lungo la direzione Z è calcolata come forza d'inerzia per la massa di sloshing m_n (calcolata da (3.4)), data quindi da:

$$F_z = m_n \ddot{z}_1; \quad (3.14)$$

Invece per quanto riguarda la forza lungo X , è stata calcolata come contributo di due componenti:

- la forza trasmessa, data dal modello MSD, calcolata come $F_{tr} = -kx_1 - c\dot{x}_1$;
- la forza di inerzia di tutto il liquido in movimento $F_{in,X} = m_f \ddot{x}_0$;

Pertanto, la forza lungo X che agisce sul flacone a causa del movimento del liquido è:

$$F_x = -kx_1 - c\dot{x}_1 + m_f \ddot{x}_0 \quad (3.15)$$

dove $k = \omega_1^2 m_n$ e $c = 2\zeta_n \omega_1$ sono rispettivamente costante di rigidità e coefficiente di smorzamento del sistema MSD, \ddot{x}_0 è l'accelerazione data al flacone e m_f è la massa totale del liquido.

Capitolo 4

Generazione di traiettorie anti-sloshing con metodi di *input shaping*

4.1 Input Shaping

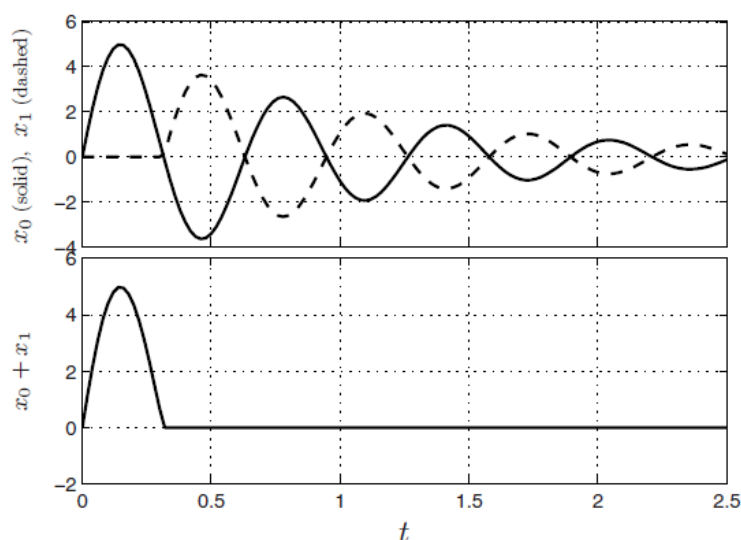


Figura 4.1: Risposta del sistema $D(s)$ (4.1) all'impulso di Dirac e cancellazione delle vibrazioni con due impulsi.

L'*input shaping* [9] è una tecnica di controllo ad anello aperto che consiste nel generare un input in grado di ridurre o eliminare le vibrazioni indotte nel sistema.

Consiste nella convoluzione di un treno di impulsi, chiamati *input shaper*, con l'input desiderato, e l'applicazione di tale segnale al sistema da controllare.

Come illustrato in [4], prendendo in esempio un generico sistema del secondo ordine, con frequenza naturale ω_n e fattore di smorzamento δ , con FdT :

$$D(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\delta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (4.1)$$

La risposta di tale sistema all'impulso di Dirac è data da:

$$x(t) = \frac{e^{-\delta\omega_n t}}{\omega_n \sqrt{1 - \delta^2}} \sin(\omega_n \sqrt{1 - \delta^2} t) \quad (4.2)$$

caratterizzata da periodo $T_0 = \frac{2\pi}{\omega_n \sqrt{1-\delta^2}}$. Il grafico superiore nella Figura 4.1 mostra la risposta del sistema ad un impulso al tempo $t_0 = 0$ (x_0 , linea continua) e quella ad un secondo impulso al tempo $t_1 = T_0/2$ (x_1 , linea tratteggiata). Le due risposte producono un'oscillazione con fase opposta.

Con la convoluzione di questi due impulsi, si ottiene la cancellazione delle vibrazioni nella risposta complessiva del sistema, come visibile nel grafico sottostante, sempre in Figura 4.1. Quindi, calcolando opportunamente l'ampiezza e il ritardo degli impulsi, è possibile eliminare le oscillazioni residue nella risposta.

L'ampiezza della vibrazione residua dell' n -esimo modo di un sistema meccanico del second'ordine, soggetto ad un treno di $N + 1$ impulsi è:

$$Z(\omega_n, \delta) = e^{-\delta\omega_n t_N} \sqrt{\left(\sum_{i=0}^N B_i \cos(\sigma_i)\right)^2 + \left(\sum_{i=0}^N B_i \sin(\sigma_i)\right)^2} \quad (4.3)$$

dove:

$$B_i = s_i e^{\delta\omega_n t_i} \quad \sigma_i = \omega_n \sqrt{1-\delta^2} t_i$$

in cui s_i è l'ampiezza dell' i -esimo impulso applicato all'istante di tempo t_i .

Nel caso più semplice, si deve imporre che l'ampiezza delle vibrazioni residue sia nulla, ovvero che $Z(\omega_n, \delta) = 0$. Si ottiene così il metodo *Zero Vibration (ZV)*.

In questo caso si impone una sola condizione ($N = 1$) per costruire un treno di $N + 1 = 2$ impulsi, con caratteristiche in Tabella 4.1.

ZV	
Istante di tempo t_i	Ampiezza s_i
$t_0 = 0$	$s_0 = 1/1 + k$
$t_1 = T_0/2$	$s_1 = k/1 + k$

Tabella 4.1: Caratteristiche degli impulsi per il metodo ZV.

in cui il periodo T_0 e la costante k sono dati da:

$$T_0 = \frac{2\pi}{\omega_n \sqrt{1-\delta^2}} \quad k = e^{-\frac{\delta\pi}{\sqrt{1-\delta^2}}} \quad (4.4)$$

Come si può notare dall'espressioni delle caratteristiche degli impulsi, l'efficacia di tale metodo dipende dalla conoscenza dei parametri del sistema, ovvero la frequenza di risonanza ω_n e il coefficiente di smorzamento δ . Se questi non sono esatti la cancellazione delle vibrazioni può risultare inaccurata. Dato che spesso dei sistemi complessi sono studiati tramite modelli semplificati, sono comuni degli errori di modellazione. Pertanto, la tecnica dell'*input shaping* può essere resa più robusta andando ad aggiungere condizioni sulla derivata dell'ampiezza della vibrazione residua rispetto la frequenza naturale, avendo quindi un numero maggiore di impulsi. In generale, il numero di impulsi è sempre pari a $N + 1$, dove N è il numero di condizioni imposte.

Con la condizione $\frac{\partial Z(\omega_n, \delta)}{\partial \omega_n} = 0$, si ottiene il metodo *Zero Vibration, Zero Derivative (ZVD)*, che sarà composto da tre impulsi ($N + 1 = 3$), con caratteristiche riportate in Tabella 4.2.

Aggiungendo un'ulteriore condizione sulla derivata seconda, ovvero $\frac{\partial^2 Z(\omega_n, \delta)}{\partial \omega_n^2} = 0$, si ha il metodo ZVDD, in cui i quattro impulsi ($N + 1 = 4$) hanno le caratteristiche in Tabella 4.3.

ZVD

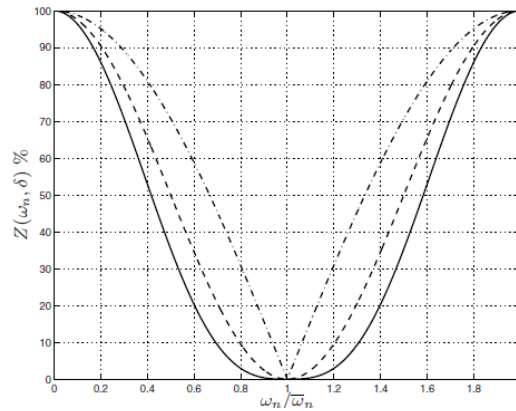
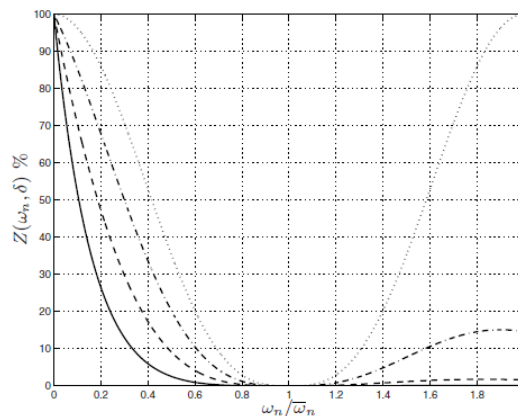
Istante di tempo t_i	Ampiezza s_i
$t_0 = 0$	$s_0 = 1/1 + 2k + k^2$
$t_1 = T_0/2$	$s_1 = 2k/1 + 2k + k^2$
$t_2 = T_0$	$s_2 = k^2/1 + 2k + k^2$

Tabella 4.2: Caratteristiche degli impulsi per il metodo ZVD.

ZVDD

Istante di tempo t_i	Ampiezza s_i
$t_0 = 0$	$s_0 = 1/1 + 3k + 3k^2 + k^3$
$t_1 = T_0/2$	$s_1 = 3k/1 + 3k + 3k^2 + k^3$
$t_2 = T_0$	$s_2 = 3k^2/1 + 3k + 3k^2 + k^3$
$t_3 = 3T_0/2$	$s_3 = k^3/1 + 3k + 3k^2 + k^3$

Tabella 4.3: Caratteristiche degli impulsi per il metodo ZVDD.

Figura 4.2: Percentuale delle vibrazioni residue, in un sistema non smorzato ($\delta = 0$), con metodi ZV (linea tratto-punto), ZVD (linea tratteggiata) e ZVDD (linea continua).Figura 4.3: Percentuale delle vibrazioni residue con metodo ZVDD, in un sistema smorzato, con diversi valori di δ : $\delta = 0$ (linea a punti), $\delta = 0.2$ (linea tratto-punto), $\delta = 0.4$ (linea tratteggiata), $\delta = 0.6$ (linea continua).

Per capire l'azione degli *shaper* ZV, ZVD e ZVDD sulle vibrazioni residue, è utile far riferimento alla Figura 4.2. Qui sono riportati i grafici della percentuale delle vibrazioni residue, rispetto al rapporto $\frac{\omega_n}{\bar{\omega}_n}$, in cui $\bar{\omega}_n$ è la frequenza di risonanza reale di un siste-

ma non smorzato ($\delta = 0$), mentre ω_n è la frequenza naturale stimata con cui è stato costruito lo *shaper*. Tutte e tre le curve presentano valore nullo in corrispondenza di $\frac{\omega_n}{\bar{\omega}_n} = 1$, tuttavia si nota che passando da ZV a ZVDD, si ha una larghezza maggiore della curva nell'intorno di $\bar{\omega}_n$. Ciò evidenzia il fatto che lo ZVDD sia il più robusto, dato che anche in caso di errore di modellazione dei parametri (ovvero quando $\frac{\omega_n}{\bar{\omega}_n}$ si discosta da 1), porta comunque ad una riduzione delle vibrazioni. Considerando invece un sistema smorzato, con $\delta > 0$, si ha che l'effetto dello *shaper* migliora per alti valori del coefficiente di smorzamento, come visibile in Figura 4.3.

Una volta scelto il metodo di *input shaping* e calcolati i vari parametri t_i ed s_i , il nuovo segnale $\bar{q}(t)$ da dare in input al sistema è dato dalla convoluzione tra lo *shaper* e la traiettoria desiderata $q(t)$, calcolato come:

$$\bar{q}(t) = \sum_{i=0}^N s_i q(t - t_i) \quad (4.5)$$

Si ottiene quindi il nuovo ingresso da dare al nostro sistema per ottenere la riduzione delle vibrazioni residue, che però presenta un aumento della durata paria a $t_N - t_0$, a causa del ritardo introdotto dalla sequenza di impulsi. Maggiore sarà la robustezza dello *shaper*, maggiore sarà il ritardo introdotto dal metodo scelto: $T_0/2$ per lo ZV, T_0 per lo ZVD e $3T_0/2$ per lo ZVDD.

4.2 Traiettorie utilizzate

Sono state prese in esame diverse traiettorie da assegnare ai flaconi durante la fase di avanzamento. Per ciascuna è stata scritta una funzione MATLAB, in cui in input si danno l'avanzamento, l'istante di tempo e la durata della legge, ed essa restituisce i valori di posizione, velocità, accelerazione e jerk al dato istante. Le leggi sono:

- Trapezoidale modificata (Figura 4.4): è la legge standard già utilizzata per l'avanzamento. Il suo nome fa riferimento alla forma del profilo dell'accelerazione, inoltre la legge è divisa in sei tratti, in particolare, nel secondo e nel quinto tratto, si ha accelerazione costante;
- Sinusoidale modificata (Figura 4.5): è composta da tre tratti sinusoidali;
- Poly 5 (Figura 4.6): è un tipo di traiettoria in cui la posizione è data da un polinomio di quinto grado, che assicura un'accelerazione continua e nulla agli estremi;
- Poly 7 (Figura 4.7): in questo caso la posizione è data da un polinomio di settimo grado, che assicura un jerk continuo e nullo agli estremi;

In seguito sono riportate le varie leggi, in cui tutti i grafici sono ottenuti assegnando un avanzamento di 100 mm raggiunto in 1 s di tempo.

Traiettoria trapezoidale modificata

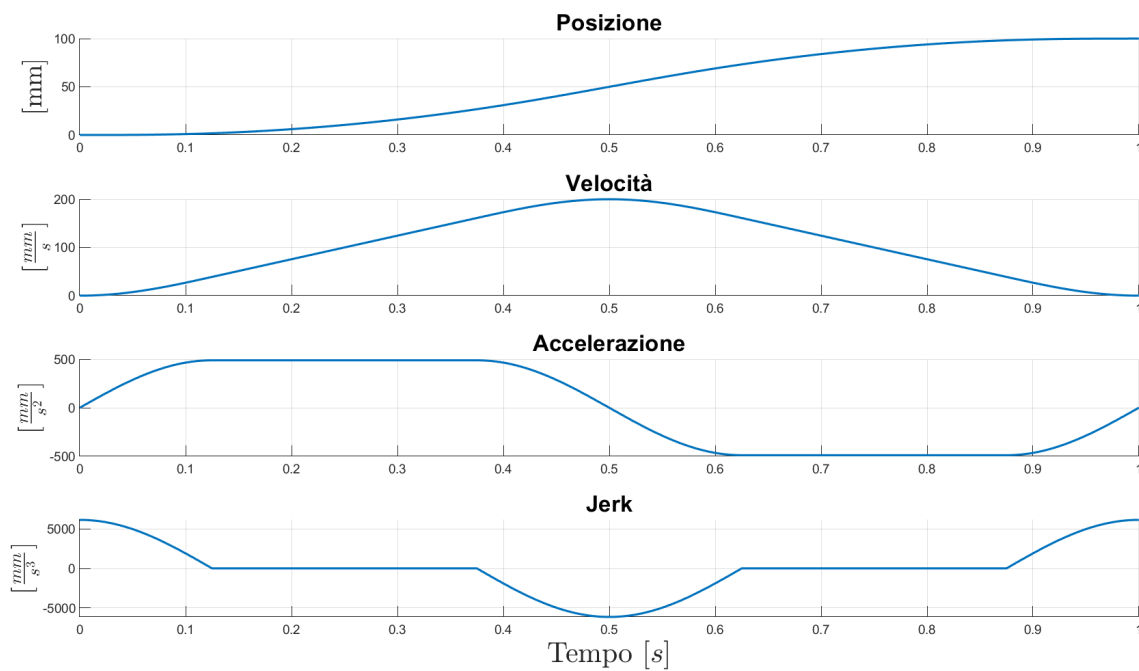


Figura 4.4: Grafici per la legge trapezoidale modificata.

Traiettoria sinusoidale modificata

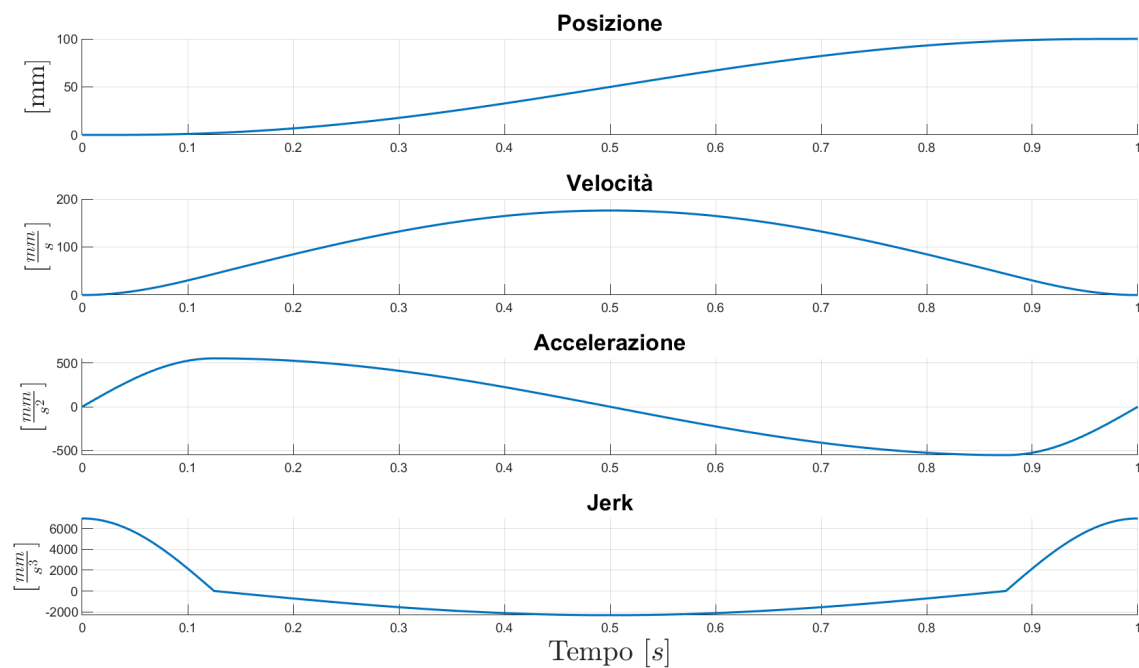


Figura 4.5: Grafici per la legge sinusoidale modificata.

Traiettoria poly5

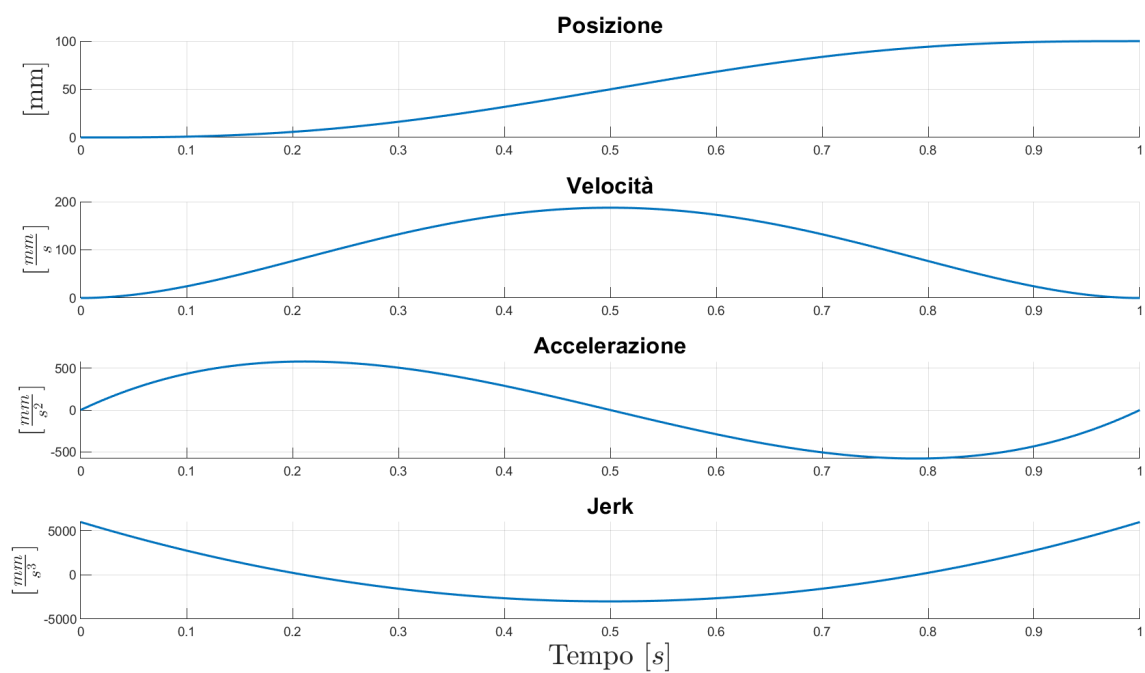


Figura 4.6: Grafici per la legge poly 5.

Traiettoria poly7

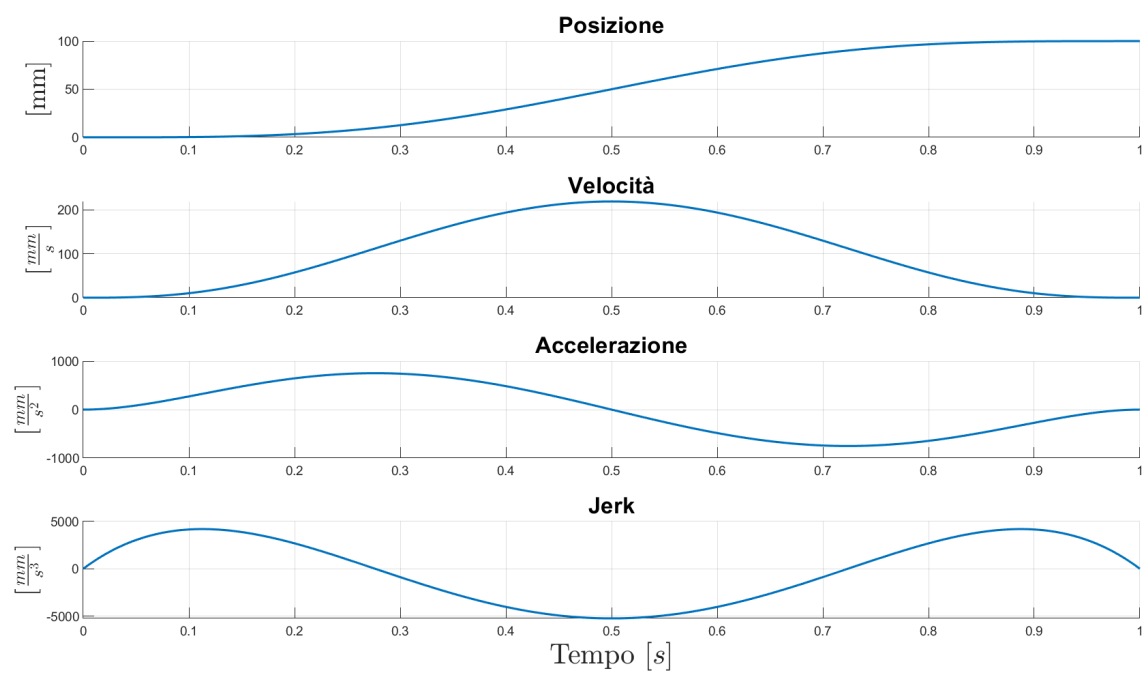


Figura 4.7: Grafici per la legge poly 7.

4.3 Applicazione dell'*input shaping* al caso dello sloshing

Come illustrato nella Sezione 3.2, il modello dello sloshing può essere ricondotto ad un sistema MSD del secondo ordine, avente frequenza naturale ω_1 e fattore di smorzamento ζ_1 . Secondo quanto descritto in [5], a questo sistema può essere applicato l'*input shaping*, con lo scopo principale di ridurre le oscillazioni residue della massa di sloshing (e quindi del liquido) causate dal moto del flacone. Dopo aver scritto un programma MATLAB per il calcolo dei vari parametri degli impulsi per il metodo ZV, è stato applicato al caso del flacone D46, alla ciclica C_1 , con legge trapezoidale modificata. In particolare con questo flacone e riempimento a 50 ml si hanno:

- $\omega_1 = 30.2262 \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right]$;
- $\zeta_1 = 0.0094$;
- $T_0 = 0.2079 \text{ [s]}$;

La nuova legge di moto, ottenuta per convoluzione, è visibile in blu sulla sinistra in Figura 4.8. Nella stessa figura a destra, è mostrata l'altezza di sloshing, ottenuta applicando la legge di moto con e senza *shaper*. Qui è ben visibile l'effetto dello ZV, in quanto le oscillazioni del liquido in fase di sosta sono eliminate, almeno dal punto di vista teorico. È da evidenziare che è stato introdotto un ritardo pari a $T_0/2$, rispetto il tempo d'avanzamento richiesto T_a . Per ovviare a tale ritardo, si deve applicare il metodo di *input shaping* a una legge avente tempo d'avanzamento $T_a - \Delta T$, in cui ΔT è il ritardo introdotto dallo specifico metodo.

Nel caso dello ZV, visibile in Figura 4.9, si ha che alla legge standard viene imposta una durata di $T_a - \frac{T_0}{2}$, così da ottenere, con la convoluzione dello *shaper*, una legge avente la durata richiesta pari a T_a . In Figura 4.10, si può notare come ora con la nuova legge che ha la durata richiesta, le oscillazioni dovute allo sloshing durante la sosta sono soppresse. Inoltre, in questo caso, applicando lo ZV si ha un'altezza massima di sloshing minore rispetto a quella ottenuta con la legge standard, avente stessa durata.

Nei grafici dell'accelerazione, nelle Figure 4.8 e 4.9, si può notare l'effetto del metodo ZV: al tempo $T_0/2$ si ha il secondo impulso, in grado di eliminare la vibrazione nel sistema. Analogamente, sono stati scritti dei programmi MATLAB anche per i metodi ZVD e ZVDD, in cui la legge di partenza da modificare avrà durata imposta pari a $T_a - T_0$ e $T_a - \frac{3T_0}{2}$, rispettivamente. I risultati sono visibili in Figura 4.11, comparati con la legge standard e lo ZV. I valori di posizione, velocità e accelerazione sono stati adimensionalizzati rapportandoli al valore massimo di ciascuno della legge standard. Si evidenzia che il valore massimo dell'accelerazione aumenta, passando dalla legge standard a quella modificata con *shaper* ZVDD: ciò accade perché la legge di partenza con cui si effettua la convoluzione del treno di impulsi è via via più breve, quindi con accelerazioni più alte, dato che dev'essere compiuto il medesimo spazio in un minor tempo.

Tutti e tre i metodi portano a un'altezza nulla durante la sosta, ciò che cambia è il comportamento del liquido previsto durante la fase di avanzamento.

Una volta terminata questa fase di implementazione dell'*input shaping* su MATLAB, si sono provate tutte le traiettorie descritte nella Sezione 4.2. Per ciascuna si è salvato il valore dell'accelerazione massima e il corrispettivo valore dell'altezza massima di sloshing ottenuto. Tale analisi è stata effettuata per il flacone D46 con riempimento a 50 ml, alla ciclica C_1 , caratterizzato dai parametri sopra scritti, e per il per il flacone D49 riempito con 100 ml, alla ciclica C_2 , con:

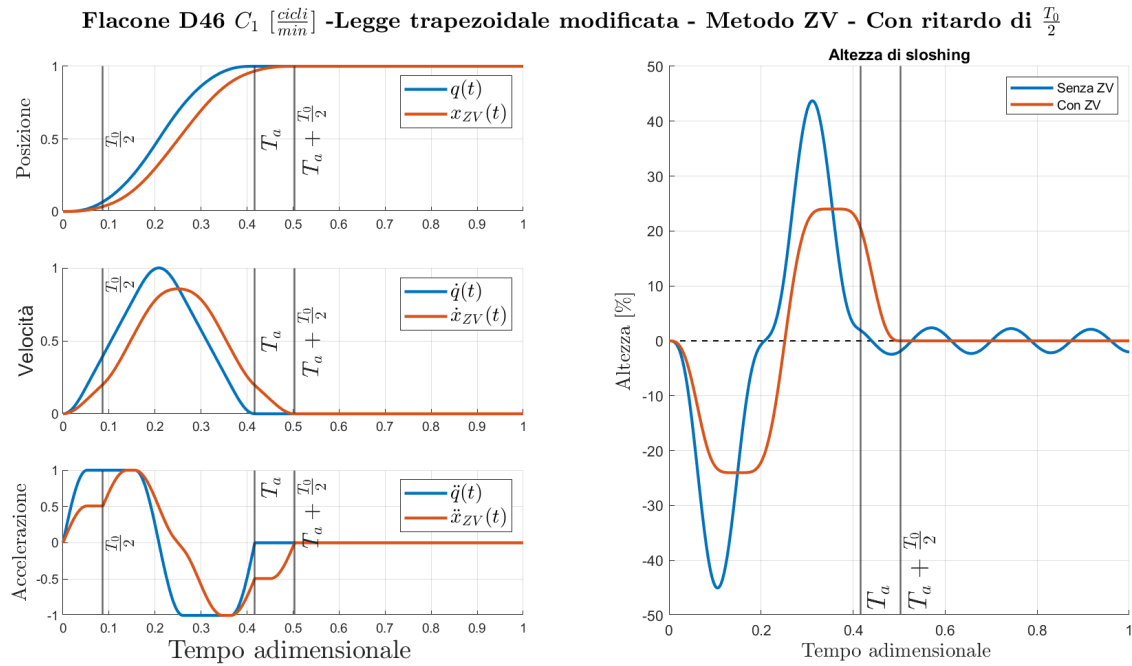


Figura 4.8: Grafici dei risultati relativi all'applicazione dello *shaper* ZV alla legge di moto trapezoidale modificata. In blu la legge standard, ed in rosso la legge ottenuta con lo *shaper* che presenta un ritardo di $T_0/2$. Sulla sinistra si hanno i grafici di posizione, velocità e accelerazione, rapportati al valore massimo. Sulla destra, la relativa l'altezza di sloshing ottenuta dall'applicazione delle due leggi al modello MSD.

- $\omega_1 = 29.1542 \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right];$
- $\zeta_1 = 0.0088;$
- $T_0 = 0.2155 \text{ [s];}$

L'applicazione della tecnica di *input shaping* al flacone D49, alla ciclica C_2 e riempimento a 100 ml, è illustrata in Figura 4.12, dove viene presa in esame la legge poly 5. Da sottolineare che la progettazione della legge di moto viene sempre effettuata impostando i parametri con il riempimento totale di ciascun flacone, ovvero la condizione più critica, dato che il pettine di avanzamento è il medesimo per entrambi i riempimenti. Ad esempio, nel caso del flacone D49, il riempimento a 70 ml avrà la legge di moto calcolata per il riempimento a 100 ml.

Con il riempimento a 70 ml si ottengono i seguenti valori:

- $\omega_1 = 29.1487 \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right];$
- $\zeta_1 = 0.0089;$
- $T_0 = 0.2156 \text{ [s];}$

Risulta evidente che applicare la legge per il 100 ml è un'approssimazione esatta, poiché l'influenza dell'altezza di riempimento sui parametri mostrati è bassa.

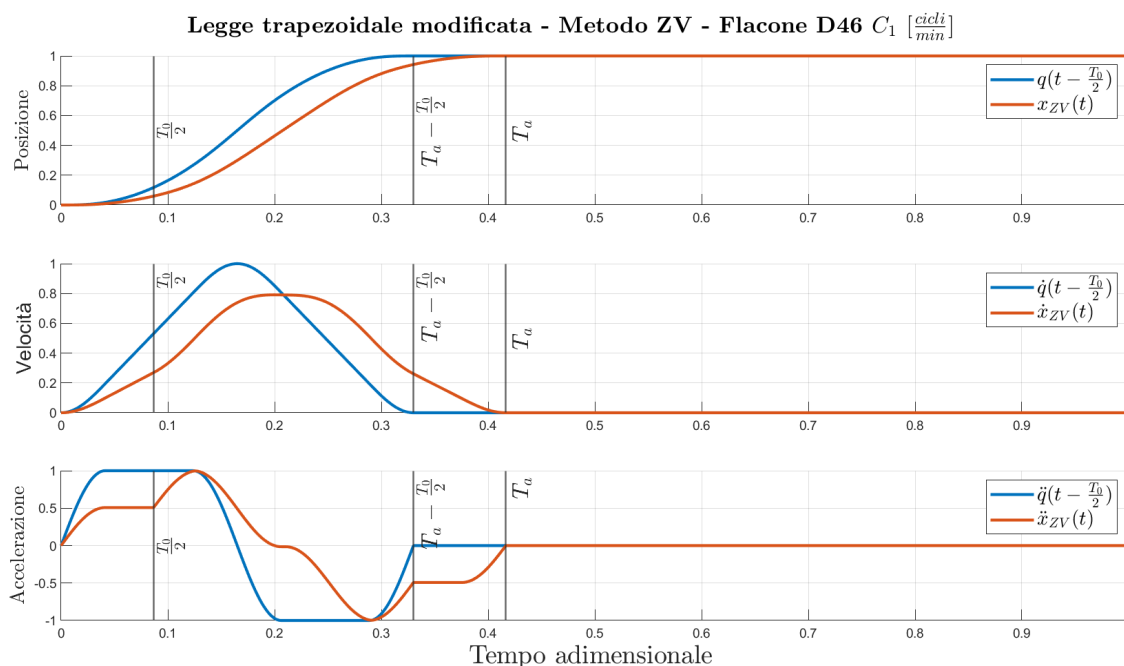


Figura 4.9: Legge di moto trapezoidale modificata, a cui è stato applicato il metodo ZV (in rosso) e la legge standard previa applicazione dello *shaper* (in blu).

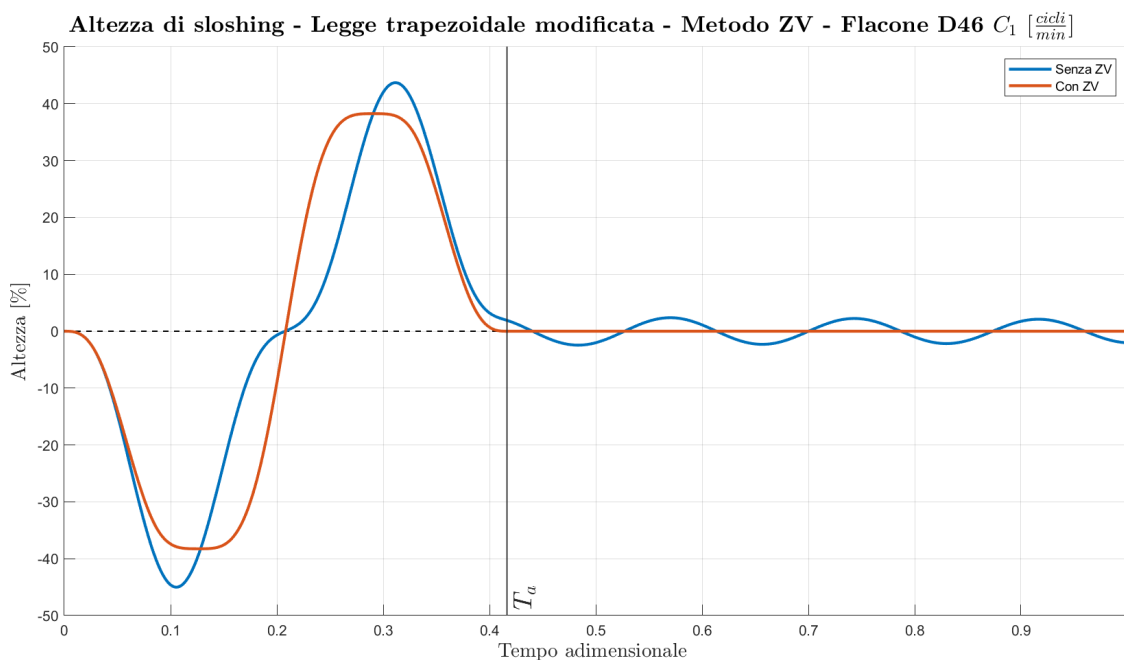


Figura 4.10: Grafico dell'altezza di sloshing per il flacone D46 con riempimento a 50 ml, in blu la risposta del sistema con legge standard, in rosso quella ottenuta applicando lo ZV, entrambe con durata complessiva pari a T_a .

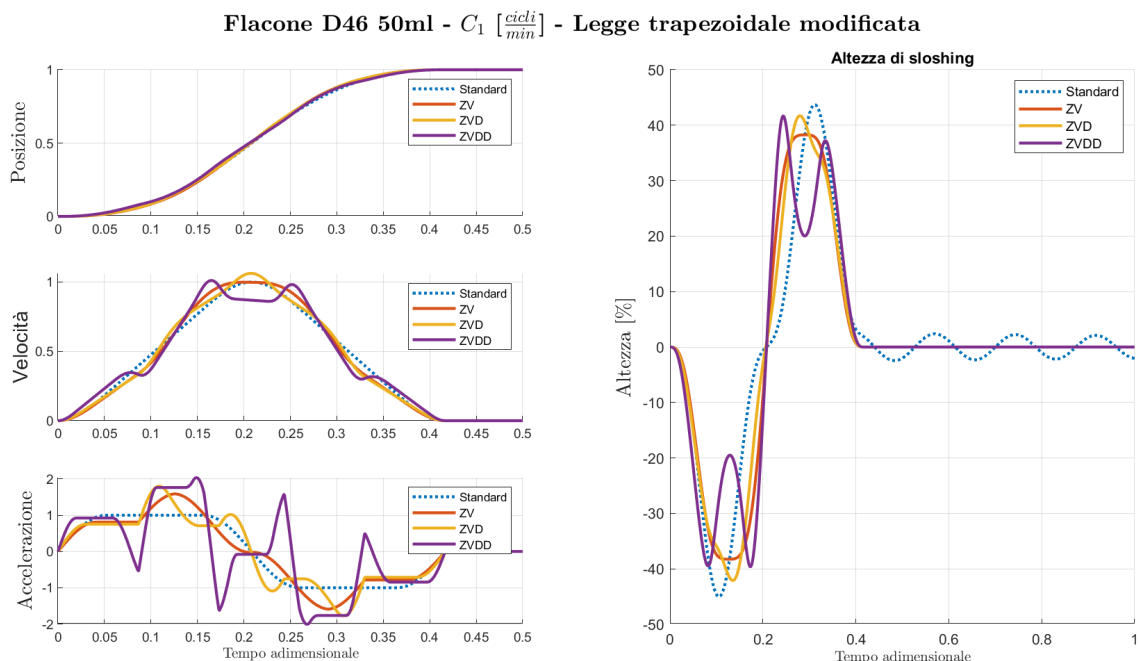


Figura 4.11: Grafici relativi all'applicazione dell'*input shaping* alla legge trapezoidale modificata, e comparazione con la legge standard, per il flacone D46 alla ciclica C_1 . Per i grafici della traiettoria, è stata messa in evidenza la parte relativa all'avanzamento.

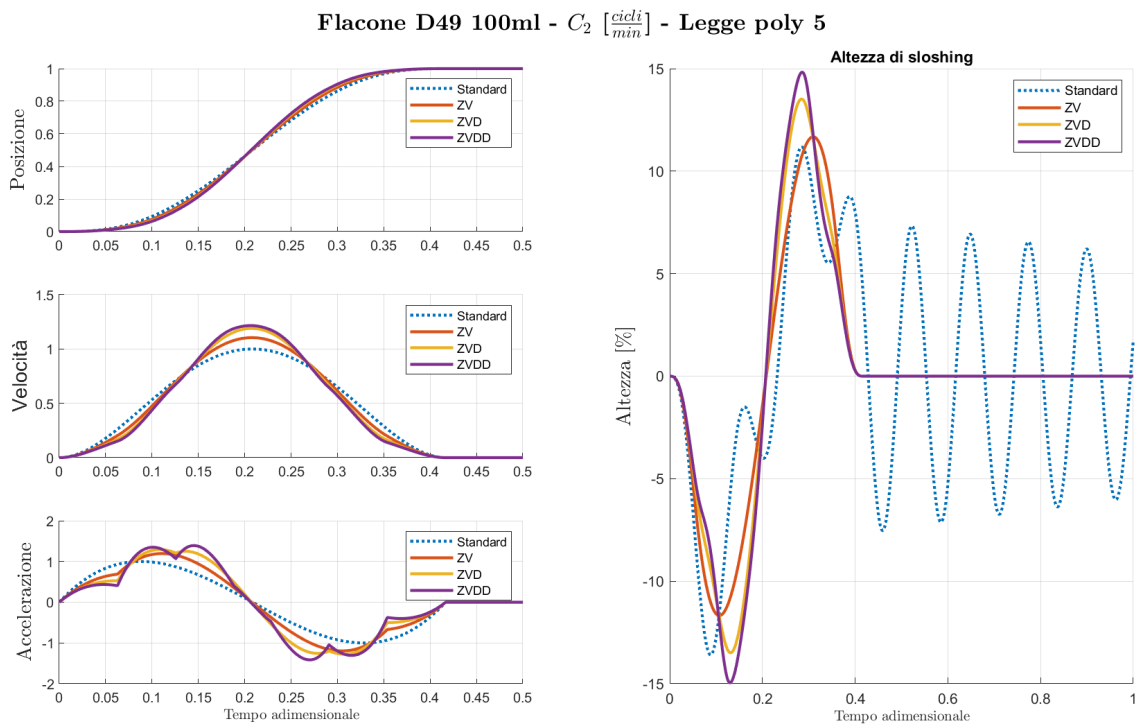


Figura 4.12: Grafici relativi all'applicazione dell'*input shaping* alla legge poly 5, e comparazione con la legge standard, per il flacone D49 alla ciclica C_2 . Per i grafici della traiettoria, è stata messa in evidenza la parte relativa all'avanzamento.

Capitolo 5

Analisi CFD

L'analisi CFD [10] (*Computational Fluid Dynamics*, ovvero fluidodinamica computazionale) è un metodo di calcolo per studiare il comportamento dei fluidi (flusso, termodinamica e le forze scambiate, ecc.), basato sull'analisi numerica ed algoritmi. È utilizzata in molti ambiti, ad esempio:

- Aeronautica, per la progettazione di profili aerodinamici e calcolo di resistenza e portanza;
- *Automotive*, per lo studio dell'aerodinamica del veicolo e studio dei flussi all'interno del motore (ad esempio anche il raffreddamento);
- Nautica, per la progettazione delle carene delle imbarcazioni;
- Industria energetica, per massimizzare l'efficienza delle turbine eoliche, per l'analisi dei flussi in macchine idrauliche (turbine e pompe), progettazione di scambiatori di calore;

Tramite l'analisi CFD è quindi possibile prevedere il comportamento di un sistema, ancor prima che si realizzi un prototipo fisico, utilizzando un modello geometrico tridimensionale della regione in cui si verificano fenomeni fluidodinamici d'interesse. Il dominio continuo di studio viene discretizzato tramite la generazione della *mesh*, ovvero l'insieme di diversi elementi tridimensionali, ai quali posso applicare dei metodi di risoluzione iterativi al fine di risolvere le equazioni di Navier-Stokes. Tali equazioni permettono di calcolare i vari parametri in gioco del flusso, come velocità, pressione e temperatura, previa impostazione delle condizioni al contorno ai limiti del dominio, ad esempio possiamo avere una certa velocità di fluido in ingresso oppure una pressione imposta all'uscita.

Il sistema di equazioni differenziali viene risolto in maniera iterativa dal calcolatore, utilizzando algoritmi inclusi nel software che si sta utilizzando. Una volta terminata la simulazione, i risultati possono essere analizzati tramite il *post-processing*, ovvero l'elaborazione e la visualizzazione dei dati d'interesse per il caso di studio, seguito da un eventuale confronto con risultati analitici o sperimentali. Dato che i test sul muletto della macchina *SMART 300* richiedono diverse ore di lavoro, in quanto è necessario ricavare le camme da assegnare ai motori del pettine attraverso la cinematica inversa per ciascuna traiettoria da testare. In aggiunta, è richiesta la sostituzione di tutte le parti di riscontro a seconda del tipo di flacone. Per ottimizzare questa procedura, sono state effettuate delle simulazioni CFD al fine di selezionare le leggi che danno risultati

migliori, i quali saranno sperimentati successivamente sulla macchina.

Il software commerciale messo a disposizione da IMA per svolgere le analisi CFD è STAR-CCM+¹ (acronimo di *Simulation of Turbulent flow in Arbitrary Regions - Computational Continuum Mechanics*), sviluppato da SIEMENS.

Anche per le analisi CFD sono state selezionate un numero limitato di leggi da testare per i flaconi D46 e D49. Tale scelta è stata fatta in base ai valori massimi di accelerazione ed altezza di sloshing associata, in modo da avere valori non troppo elevati.

Per il flacone D46, alla ciclica C_1 , si sono scelte le leggi:

- Trapezoidale modificata, con metodo ZV;
- Sinusoidale modificata, con metodo ZV e ZVD;
- Poly 5, con metodo ZV e ZVD;

Mentre per il flacone D49, alla ciclica C_2 , si sono selezionate le leggi:

- Trapezoidale modificata, con metodo ZV, ZVD e ZVDD;
- Sinusoidale modificata, con metodo ZV e ZVD;
- Poly 5, con metodo ZV e ZVD;

Le leggi basate sulla traiettoria poly 7 sono state scartate, in entrambi i casi, dato che si ottengono accelerazioni ed altezza di sloshing maggiori rispetto alle altre traiettorie. Ciò è dovuto al fatto che la poly 7 garantisce la continuità del jerk, rendendola non adatta a questo particolare utilizzo.

5.1 Impostazione delle simulazioni CFD

Il primo passo da compiere per impostare un'analisi CFD è definire la geometria del modello che si desidera simulare. Poiché il fluido occupa la parte interna del flacone, è stato necessario ottenere tale geometria attraverso un software CAD 3D, successivamente esportata in formato STL. Tale procedura è stata effettuata per tutti i flaconi, in Figura 5.1 è visibile per il D46.

Successivamente la geometria è stata importata e divisa all'interno di STAR-CCM+, in particolare si hanno due regioni:

- *Inlet*, ovvero la superficie dell'imbocco del flacone;
- *Walls*, ossia la superficie che rappresenta le pareti del flacone;

Le regioni impostate sono mostrate in Figura 5.2 per il flacone D46. Per impostare la mesh si sono utilizzati diversi strumenti del software:

- *Polyhedral meshing*, vengono utilizzate delle celle poliedriche, aventi in media 14 facce;
- *Prism layer mesher*, utilizzato per generare delle celle prismatiche ortogonali alle superfici delle pareti, per avere una migliore accuratezza della soluzione in queste zone, soprattutto per quanto riguarda il flusso e le forze;

¹<https://plm.sw.siemens.com/it-IT/simcenter/fluids-thermal-simulation/star-ccm/>

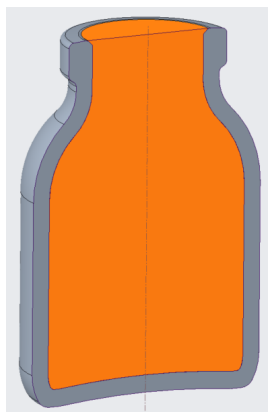


Figura 5.1: Sezione del modello 3D del flacone D46, in arancione si può notare la parte interna necessaria per la simulazione CFD.



Figura 5.2: A sinistra la regione *Inlet*, mentre a destra la regione *Walls*, per il flacone D46.

- *Surface mesher*, permette di migliorare la qualità di una superficie esistente, nel nostro caso le pareti del flacone importate tramite file STL;
- *Automatic surface repair*, fornisce una procedura automatica per correggere eventuali problemi sulle geometrie, a seguito di un remeshing di una superficie;

Per la dimensione di base della mesh è stata scelta di 2 mm per i flaconi D46 e D49. In seguito, è necessario configurare la fisica del problema, ovvero definire le fasi e le interazioni tra di esse, optando un modello multifase euleriano, che viene impiegato quando le fasi si interpenetrano tra di loro.

Le due fasi sono acqua e aria, le cui caratteristiche sono impostate dal database interno del software. Dato che questa simulazione è dipendente dal tempo è stata scelta una modellazione del tempo di tipo implicito, nello specifico un solutore *Implicit Unsteady*, che ha come funzione primaria quella di controllare l'aggiornamento del tempo fisico della simulazione e la dimensione del *time-step*, ovvero l'intervallo di tempo minimo apprezzabile nella simulazione. Poiché tutti gli avanzamenti dei flaconi richiedono meno di 1 s, è stato impostato un *time-step* di 0.0001 s al fine di apprezzare accuratamente il movimento del liquido. Per implementare il modello multifase euleriano è stato utilizzato il metodo VOF (*Volume Of Fluid*). Con questo metodo, la distribuzione delle fasi è descritta dalla variabile di frazione volumetrica α ($0 \leq \alpha \leq 1$),

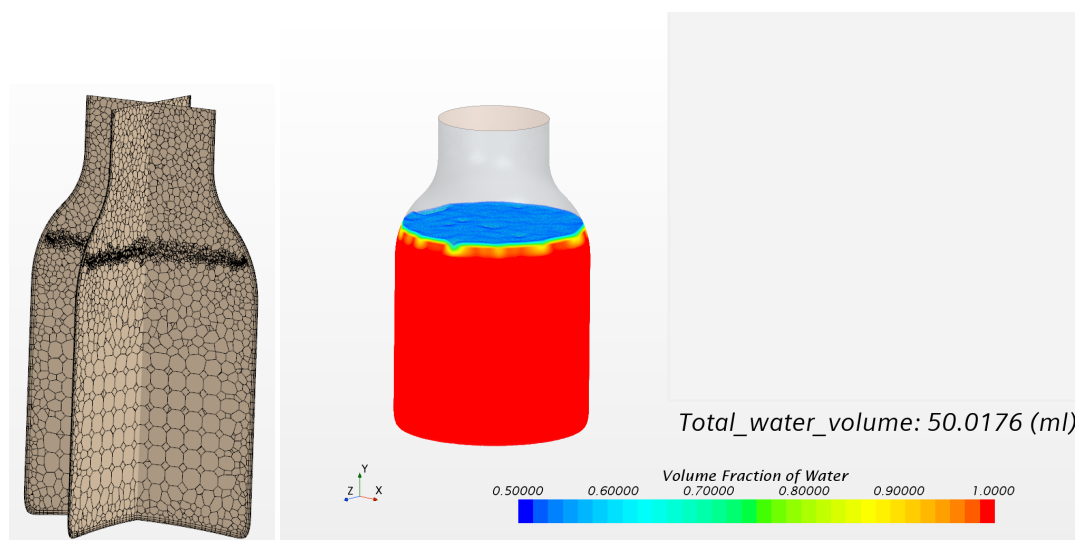


Figura 5.3: A sinistra la mesh generata per il flacone D46, è ben visibile l'infiltramento della griglia in corrispondenza del pelo libero. A destra il riempimento a 50 ml.

che rappresenta la frazione di volume occupata da un fase in un elemento della mesh. Per la fase i , la frazione volumetrica è definita da:

$$\alpha_i = \frac{V_i}{V} \quad (5.1)$$

dove V_i è il volume della fase i nell'elemento della mesh, mentre V è il volume dell'elemento. Per descrivere la variazione spaziale e temporale della frazione volumetrica di una fase immiscibile all'interno di un dominio sono utilizzate dal software le equazioni di trasporto, ossia delle equazioni di conservazione della massa.

Infine, per concludere l'impostazione della fisica del problema, è stato inserito il metodo *Adaptive Mesh Refinement*, che, secondo quanto descritto in [11], consente di migliorare automaticamente l'accuratezza della soluzione nelle regioni rilevanti del dominio. Ciò è ottenuto tramite l'infiltramento dinamico della mesh, per simulare in dettaglio zone con turbolenze o interazioni tra fasi diverse. Successivamente, sono state impostate le condizioni iniziali della simulazione, ovvero pressione atmosferica all'imbocco del flacone, quindi nella regione *Inlet*, e il volume di riempimento. Per parametrizzare il riempimento da simulare, è stata creata una funzione in cui è possibile inserire il valore dell'altezza del pelo libero in condizioni statiche, in mm. Al di sotto di questo valore, il volume del flacone sarà occupato da acqua, mentre al di sopra sarà occupato da aria.

La mesh e il riempimento a 50 ml per il flacone D46 sono visibili in Figura 5.3. terminate le condizioni iniziali, si passa al moto del flacone, impostato tramite l'accelerazione lungo la direzione X . L'accelerazione è stata importata nel software CFD attraverso una tabella, ottenuta con MATLAB. Questa tabella presenta due colonne: una con i valori discreti dei gradi macchina (da 0 a 360) e l'altra con i valori dell'accelerazione corrispondenti per la traiettoria da simulare, calcolati con il programma descritto nella Sezione 4.3.

L'andamento dell'accelerazione del flacone è dato al software CFD per valori discreti rispetto i gradi macchina, consentendo la simulazione di più cicli di avanzamento della macchina. In particolare, il tempo della soluzione è calcolato tramite la seguente

operazione:

$$\text{Tempo soluzione} = \frac{\text{Gradi Macchina}}{360} \cdot (\text{Tempo Ciclo}) \cdot \text{mod}[\text{cicli}, 360] \quad (5.2)$$

in cui:

- Gradi Macchina: valore dei gradi macchina a cui si trova la simulazione in un generico istante;
- Tempo Ciclo: tempo richiesto per un singolo ciclo, calcolato nella Sezione 2.2;
- $\text{mod}[\text{cicli}, 360]$: funzione che restituisce il resto del rapporto tra *cicli*, ovvero il numero di cicli che si desidera simulare, e 360;

È stata quindi creata una funzione per assegnare l'accelerazione al flacone, ricavata per mezzo di interpolazione dei valori della tabella. Per completare la fase impostazione del CFD, sono stati selezionati i salvataggi da effettuare durante il calcolo della soluzione. Per visualizzare visivamente il movimento del liquido all'interno del flacone, viene salvata ad ogni iterazione la schermata di risoluzione del software. Questi frame verranno successivamente combinati per dare un video complessivo della simulazione. È stato inoltre creato un grafico per tener traccia dell'altezza massima del liquido nel flacone, utilizzando lo strumento *Threshold* del software, cioè una funzione soglia che registra a che altezza si trova un determinato elemento della mesh quando la frazione volumetrica dell'acqua supera il valore 0.4.

Infine, STAR-CCM+ consente il calcolo delle forze agenti sulle pareti del flacone lungo le direzioni *X*, *Y* e *Z*. Nello specifico, tali forze sono registrate nella regione *Walls* (Figura 5.2) e sono il risultato della combinazione di forze di pressione e taglio sulla superficie degli elementi mesh. Le forze sono principalmente dovute a effetti di pressione, fenomeni di attrito (ad esempio la viscosità del fluido), gradienti di velocità nella regione d'interesse e alla gravità agente sul fluido. È possibile ora lanciare tutte le simulazioni per le varie leggi, previa variazione dei vari parametri e delle tabelle dell'accelerazione a seconda del flacone preso in analisi.

5.2 Risultati delle analisi CFD

Una volta terminate le simulazioni, è stato possibile elaborare i dati e valutare il comportamento del liquido nel flacone.

Per il flacone D46 con riempimento a 50 ml, si è scelto di testare in macchina le seguenti leggi:

- Trapezoidale modificata, con metodo ZV;
- Poly 5, con metodo ZV e ZVD;

Nello specifico, la traiettoria che presenta il miglior comportamento del liquido dal punto di vista della riduzione delle oscillazioni residue è la legge poly 5 ZV. Le leggi basate sulla sinusoidale modificata sono state scartate poiché il liquido presenta oscillazioni più evidenti durante la fase di sosta. In aggiunta, come evidenziato nel confronto in Figura 5.4, con la legge sinusoidale ZV il liquido raggiunge altezze maggiori rispetto alla legge poly 5 ZV.

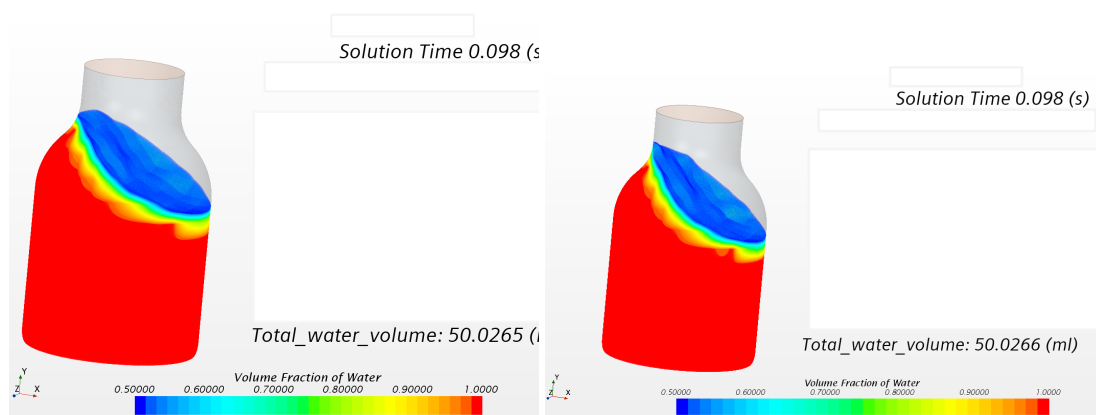


Figura 5.4: A sinistra la simulazione CFD, alla ciclica C_1 , della legge poly 5 ZV, e a destra, la legge sinusoidale ZV, riportate allo stesso istante per il flacone D46. In quest'ultimo caso, il liquido raggiunge un'altezza maggiore.

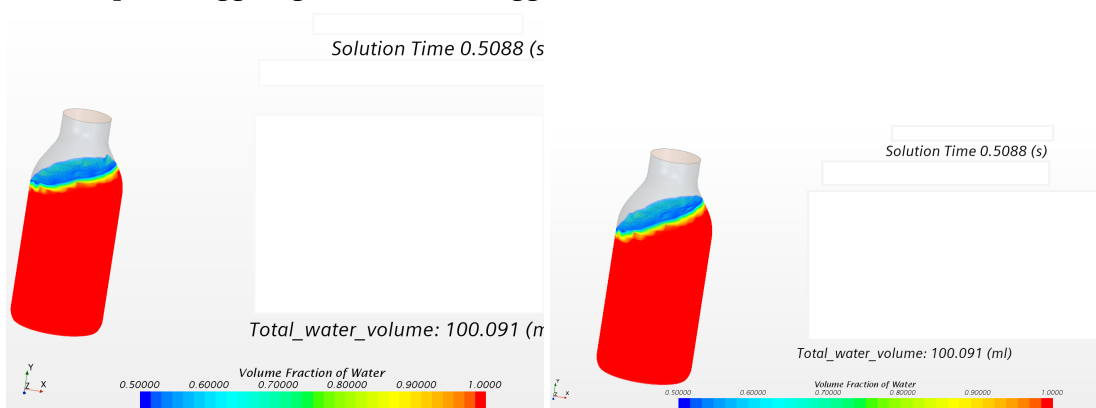


Figura 5.5: A sinistra la simulazione CFD, alla ciclica C_2 della legge trapezoidale ZV, e a destra, la legge trapezoidale ZVDD, riportate allo stesso istante per il flacone D49.

Tuttavia, sempre nella stessa figura, si nota che il liquido raggiunge un'altezza di sloshing molto elevata, arrivando all'imbocco del flacone. Si è deciso quindi di diminuire del 20% la ciclica con cui viene elaborato questo flacone, passando da C_1 a C'_1 . Con questa nuova ciclica, sono state ricalcolate le traiettorie anti-sloshing ed successivamente simulate.

Le osservazioni fatte per le leggi anti-sloshing, sono analoghe a quelle fatte precedentemente, infatti la poly 5 ZV si riconferma la migliore.

Per quanto riguarda il flacone D49, con riempimento a 70 e 100 ml, si è scelto di testare in macchina tutte le leggi, ovvero:

- Trapezoidale modificata, con metodo ZV, ZVD e ZVDD;
- Sinusoidale modificata, con metodo ZV e ZVD;
- Poly 5, con metodo ZV e ZVD;

In questo caso i risultati sono simili tra di loro, complice la ciclica C_2 che comporta velocità minori. Tra queste leggi, quella che presenta un'altezza maggiore del liquido è la trapezoidale ZVDD, come mostrato nel confronto in Figura 5.5. È stato scelto di testarla comunque in macchina per verificare se lo ZVDD conferisse alla legge una maggiore stabilità nel caso dell'applicazione reale, in presenza quindi di eventuali errori di approssimazione del modello.

Visivamente, anche per il flacone D49, la legge poly 5 ZV è quella che porta al miglior comportamento del liquido durante la fase di sosta.

5.3 Comparazione dei dati ottenuti da MATLAB e da CFD

Dalle simulazioni CFD, non solo è stato ottenuto un risultato visivo dell'andamento del liquido nel flacone, ma anche dati riguardanti l'altezza del liquido e le forze generate durante il moto del flacone. È stato dunque ritenuto interessante confrontare questi dati con quelli ottenuti tramite il modello MSD, calcolato tramite MATLAB. In primo luogo, dato che il CFD fornisce l'altezza massima nel liquido su tutto il flacone, sono stati ricalcolati i valori dell'altezza di sloshing con il programma MATLAB, andando però a considerare il valore assoluto di $\bar{\eta}$. In questo modo, anche tramite MATLAB, si ottiene l'altezza massima del liquido su tutto il flacone, e non solo rispetto a una parete. Successivamente, sono state calcolate le forze F_x ed F_z per ciascuna legge considerata, come descritto nella Sezione 3.2.2. Facendo riferimento alle immagini riportate in precedenza delle simulazioni CFD, secondo la configurazione del modello 3D, la forza agente lungo la verticale è rappresentata lungo l'asse Y . Pertanto, per la comparazione con la forza F_z del modello MSD, è stato preso in considerazione tale valore. Il confronto tra i due modelli è stato effettuato per il flacone D46 riempito con 50 ml, alle cicliche C_1 e C'_1 , e per il flacone D49 alla ciclica C_2 , con entrambi i riempimenti. Le leggi che sono state comparate includono la poly 5 ZV e la trapezoidale modificata ZV, insieme alle rispettive leggi non modificate con *input shaping*.

Di seguito sono mostrati i confronti relativi alla legge poly 5 ZV. In ogni immagine, sulla sinistra è presente la traiettoria di riferimento con i grafici di posizione, velocità, accelerazione e jerk, ciascuno rapportato al valore massimo della legge poly 5 senza ZV.

Per la prima figura nella parte superiore, nella parte destra sono stati graficati gli andamenti dell'altezza massima del liquido, ottenuti da MATLAB e da simulazione CFD. In questi grafici, si può osservare come il modello MATLAB approssimi abbastanza bene l'altezza di sloshing prevista e simulata con il CFD, in particolar modo la frequenza di oscillazione durante la sosta. Per i riempimenti totali, quindi nelle Figure 5.6, 5.7 e 5.8, è evidente che l'altezza calcolata tramite MATLAB risulta sovrastimata. Nelle simulazioni CFD, con questi riempimenti il liquido raggiunge i raccordi presenti nel flacone, che non erano previsti nel modello MATLAB in quanto si è assunto un recipiente perfettamente cilindrico. Perciò, questo fatto porta a una lettura differente dell'altezza di sloshing. Infatti, in Figura 5.9 è possibile vedere come con il riempimento a 70 ml l'altezza di sloshing sia compatibile tra MATLAB e CFD, in quanto con questo riempimento il liquido si mantiene nella parte del flacone in cui le pareti sono cilindriche.

In tutti i grafici relativi all'altezza di sloshing, è visibile l'effetto del metodo ZV, poiché l'oscillazione del liquido registrata dal software CFD risulta ridotta. Le figure nella parte inferiore, invece, illustrano il confronto per le forze. Per le forze lungo X , riportate al centro delle immagini, è evidente che l'approssimazione del modello MATLAB risulta sempre più accurata aumentando il riempimento considerato. Infatti, per il 100 ml, come mostrato in Figura 5.8, i grafici di MATLAB e del CFD sono praticamente sovrapposti. Infine, nella parte destra delle immagini sono riportate le forze lungo la direzione Z . Anche in questo caso, il modello MATLAB fornisce un risultato molto vicino a quello ottenuto dal CFD. In Figura 5.8, si osserva come l'andamento di F_z sia simile tra i due risultati, specialmente per la legge standard (senza ZV), in cui l'oscillazione delle forze durante la sosta è in fase nei due modelli considerati. Da questa analisi è emerso come il mo-

dello semplificato MSD, calcolato con MATLAB, sia, in prima approssimazione, simile al modello CFD. Ciò può risultare molto utile nella previsione del comportamento di un recipiente soggetto al fenomeno dello sloshing. Infatti, l'uso di un programma MATLAB, che richiede pochi minuti per essere impostato ed eseguito, consente di ottenere dei risultati simili a quelli derivanti da un'analisi CFD, la quale richiede molte ore di calcolo, oltre alla predisposizione dell'intera simulazione (descritta nella Sezione 5.1). Un'importante limitazione riscontrata da MATLAB è l'assenza delle non linearità dal modello. Infatti, dopo l'applicazione dell'*input shaping* alla legge, durante la fase di sosta, tutte le possibili variazioni dovute alle non linearità non sono osservabili. Ciò si verifica perché, dal punto di vista teorico, vengono eliminate tutte le oscillazioni residue nel modello MSD, e quindi anche nel calcolo dell'altezza di sloshing e delle forze, tali valori risultano nulli.

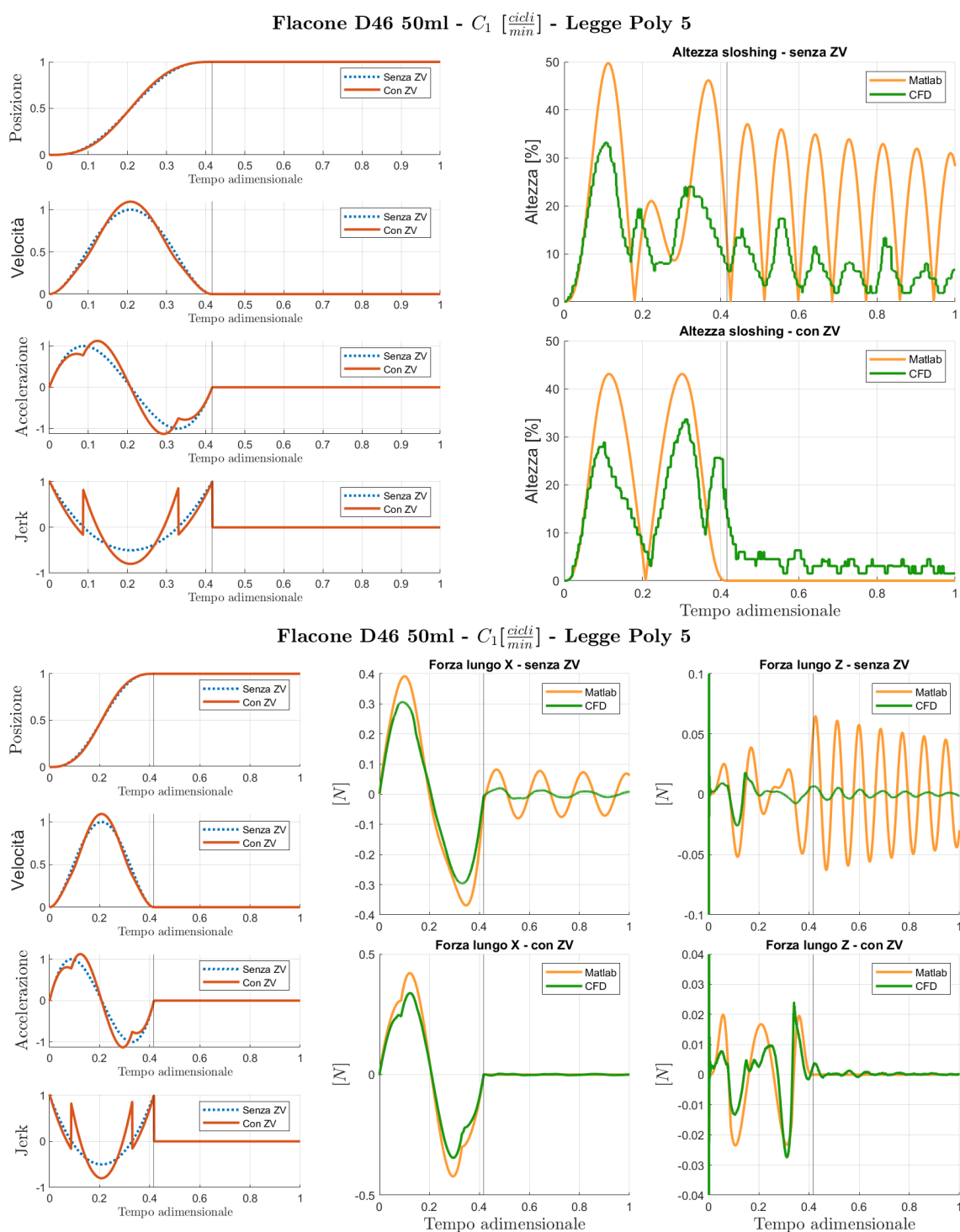


Figura 5.6: Confronto tra risultati MATLAB e risultati CFD per il flacone D46, alla ciclica C_1 e riempimento 50 ml.

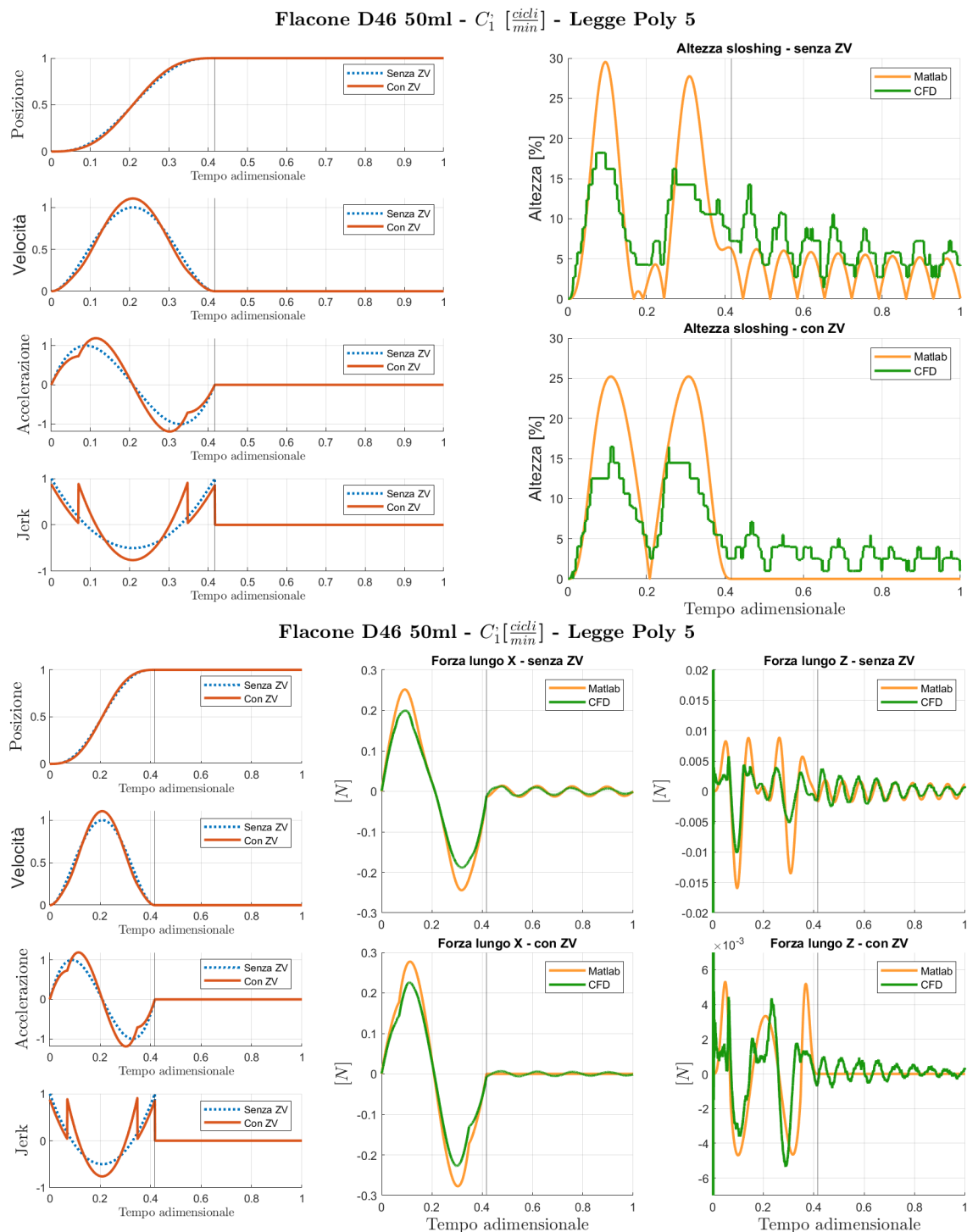


Figura 5.7: Confronto tra risultati MATLAB e risultati CFD per il flacone D46, alla ciclica C_1' e riempimento 50 ml.

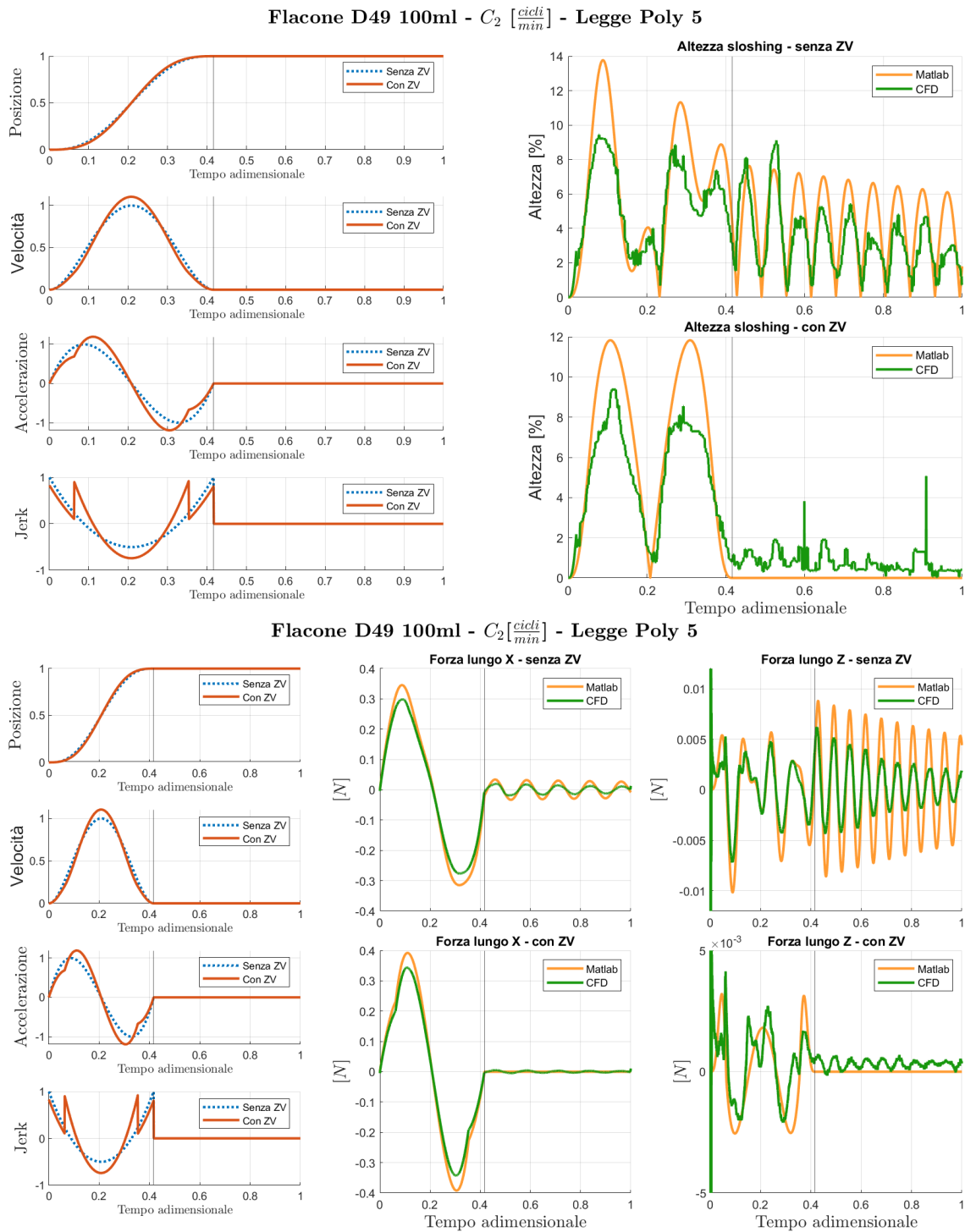


Figura 5.8: Confronto tra risultati MATLAB e risultati CFD per il flacone D49, alla ciclica C_2 e riempimento 100 ml.

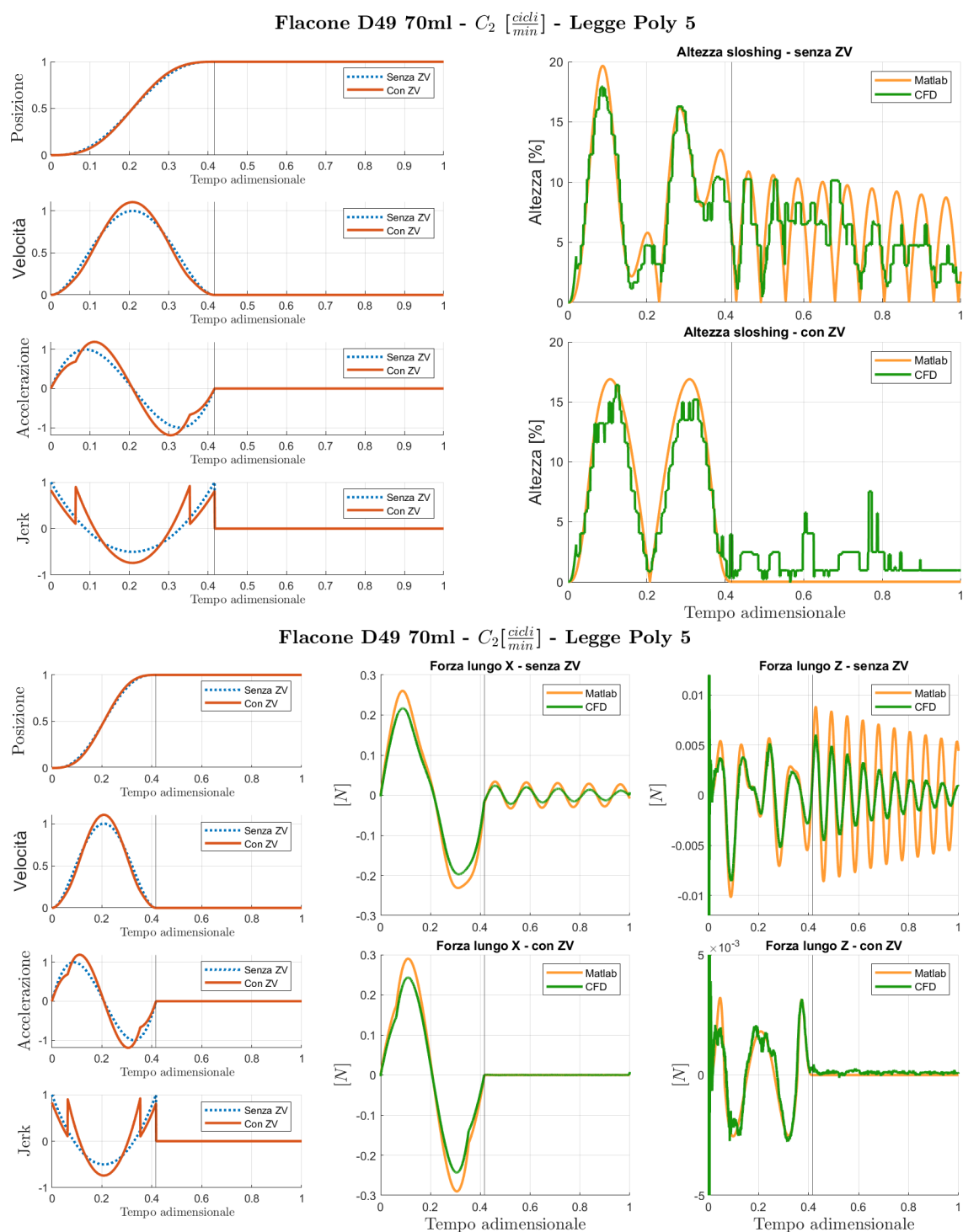


Figura 5.9: Confronto tra risultati MATLAB e risultati CFD per il flacone D49, alla ciclica C_2 e riempimento 70 ml.

Capitolo 6

Test sperimentali delle traiettorie anti-sloshing

Selezionate le leggi da testare sul muletto della macchina *SMART 300*, si procede quindi alla generazione delle camme per i motori che gestiscono il pettine. Utilizzando un programma MATLAB (già presente per questa macchina), si calcola la cinematica inversa per ogni traiettoria. In aggiunta, vengono calcolati vari parametri per il controllo software dei motori, come le accelerazioni angolari massime e gli angoli iniziali di posizionamento. Per valutare l'efficacia delle leggi anti-sloshing, inizialmente sono stati effettuati dei test brevi, in cui viene analizzato un numero limitato di flaconi. Successivamente, selezionate le leggi che danno i risultati migliori, si è passati a dei test di lunga durata con l'analisi di un numero più elevato di campioni. Come descritto nella Sezione 2.1, la macchina *SMART 300* è dotata di una serie di stazioni di controllo peso. Tale controllo è svolto durante la fase di sosta del flacone, nello specifico in una determinata finestra di gradi macchina (Sezione 2.2), che va da $(\theta + \lambda_1)^\circ$ a $(\theta + \lambda_1 + \lambda_{\text{pesatura}})^\circ$, in cui:

- θ° : gradi in cui avviene l'avanzamento;
- λ_1° : gradi in cui si lascia un certo tempo di assestamento del flacone sulla bilancia a seguito del moto;
- $\lambda_{\text{pesatura}}^\circ$: gradi in cui viene effettivamente letto e registrato il peso del flacone;

Le bilance di cui è provvisto il muletto sono delle Wipotec SL-M 250/300-FS, dotate di convertitore ad alta risoluzione. La scheda tecnica è consultabile in Appendice A. Queste bilance sono in grado di rilevare variazioni fino a 0.0005 g. Il muletto è equipaggiato con due gruppi di bilance, ciascuno composto da 6 unità. Uno di essi è posizionato a monte della stazione di dosaggio, mentre l'altro si trova a valle; solo i dati provenienti da quest'ultimo saranno analizzati. Per questioni di tempo e semplicità, la stazione di riempimento non è stata utilizzata in questo studio. I flaconi sono stati riempiti manualmente con acqua, numerati e pesati con l'ausilio di una bilancia da laboratorio, in modo da poter associare a ogni flacone il relativo peso.

Per ciascun flacone, è stato possibile confrontare i pesi provenienti dalle bilance con quelli misurati in condizioni statiche al fine di valutare l'errore di pesatura che si ha in condizioni operative della macchina, calcolato come la differenza dei due risultati. Dato che i flaconi vengono pesati più volte, sono state considerate la media e la

deviazione standard degli errori di pesatura ottenuti durante ogni test. Per quanto riguarda i test brevi, il muletto è stato impostato per una movimentazione del pettine tramite *teach pendat* (ovvero un pulsante per l'azionamento manuale della macchina) e un riposizionamento dei flaconi eseguito da un operatore. Ciò è stato fatto poiché la macchina è attualmente sprovvista del sistema di ricircolo e non è in grado di funzionare in maniera completamente autonoma. L'avanzamento lungo la macchina di un gruppo di 4 flaconi è stato ripetuto 20 volte per ciascuna legge e per ogni riempimento considerato. È stata svolta quindi una prima verifica visiva del comportamento del liquido nei flaconi, e sono stati valutati i valori letti dalle bilance del controllo peso, al fine di valutare quale legge produce gli errori minori. Terminata questa prima fase di prove, sono state selezionate le migliori leggi per ogni flacone, da essere provate con dei test di lunga durata. Questi test sono necessari per definire l'accuratezza del sistema di pesatura. Infatti, sono stati effettuati anche a cicliche inferiori alla nominale, poiché servono da validazione per le prestazioni effettive della macchina in tutte le possibili condizioni di lavoro. Il muletto è stato caricato con 90 flaconi (riempiti, numerati e pesati), mentre per la restante parte la macchina è stata riempita di flaconi vuoti, indispensabili per il corretto funzionamento del ricircolo automatico dei flaconi. Per ogni riempimento e ogni ciclica sono stati analizzati circa 1000 campioni, un numero volutamente elevato per scongiurare possibili aleatorietà, ad esempio causate da saltellamenti del flacone al di sopra dei piattelli delle bilance. È da sottolineare che le leggi di moto anti-sloshing sono progettate per la ciclica nominale. La macchina, infatti, andrà a dilatare o contrarre la legge di moto nel tempo, a seconda che la ciclica sia minore o maggiore, rispettivamente. Ciò porta quindi a una variazione del tempo di avanzamento, di fondamentale importanza per stabilire gli istanti di tempo a cui vengono applicati gli impulsi del metodo *input shaping*, e si potrebbero avere quindi degli effetti indesiderati sul liquido.

6.1 Risultati per il flacone D46



Figura 6.1: Confronto dell'altezza di sloshing per il flacone D46, alla ciclica C_1 . In alto la legge standard ed in basso la legge trapezoidale ZV.

Per le tre leggi anti-sloshing provate alla ciclica C_1 (Sezione 2.3), persiste il problema anticipato dalle simulazioni CFD, ovvero un'altezza di sloshing molto alta, anche se non si ha più fuoriuscita di liquido come con la legge standard. In Figura 6.1, è ben visibile come con la legge trapezoidale ZV non si abbiano miglioramenti dal punto di vista dell'altezza massima raggiunta dal liquido. Comunque, durante la fase di sosta è stata notata una diminuzione nell'ampiezza delle oscillazioni residue dovute allo sloshing. Passando invece alla ciclica C'_1 (Sezione 2.3), si nota che, con velocità minori,



Figura 6.2: Confronto delle oscillazioni residue per il flacone D46, alla ciclica C_1' , durante la fase di sosta. In alto la legge standard ed in basso la legge poly 5 ZV.

D46 - 50ml				D46 - 50ml				D46 - 50ml			
Poly5 ZV Antislosh		Trapezia STD		Poly5 ZVD Antislosh		Trapezia STD		Trapezia ZV Antislosh		Trapezia STD	
C_1' [cicli/min]		C_1' [cicli/min]		C_1' [cicli/min]		C_1' [cicli/min]		C_1' [cicli/min]		C_1' [cicli/min]	
	[mg]	Media	/		[mg]	Media	/		[mg]	Media	/
		36	/			36	/			36	/
Errore totale	-71.60%			Errore totale	€			Errore totale	-43.82%		

Figura 6.3: Diminuzione dell'errore totale, rispetto quello ottenuto per la legge standard indicato con ϵ , per il flacone D46 riempito con 50 ml alla ciclica C_1' . I dati sono stati omessi per questioni di riservatezza aziendale.

l'altezza massima di sloshing non risulta problematica in tutte e tre le leggi. Infatti il liquido non arriva in prossimità della zona di tappatura del flacone.

Visivamente, si nota un miglioramento per quanto riguarda la cancellazione delle oscillazioni residue del flacone con l'utilizzo delle traiettorie modificate con *input shaping*, come mostrato in Figura 6.2 nel caso della poly 5 ZV. Per valutare quale legge sia effettivamente la migliore tra le tre, sono stati analizzati i dati provenienti dalle bilance del controllo peso. Nella Figura 6.3, sono riportati i risultati ottenuti dalle prime prove. L'errore totale per ciascuna legge è dato dalla somma della media e tre volte la deviazione standard ($media + 3\sigma$) di tutti gli errori di pesatura ottenuti. Questi errori sono ottenuti per ciascun flacone come la differenza tra il peso misurato in condizioni statiche e il peso rilevato dalle bilance in macchina. Per ogni legge anti-sloshing, l'errore totale $\epsilon_{anti-sloshing}$ è riportato come diminuzione percentuale rispetto a quello della legge trapezoidale standard, indicato con ϵ . Tale diminuzione è ottenuta tramite la seguente espressione:

$$\text{Diminuzione percentuale errore} = -100 \left(1 - \frac{\epsilon_{anti-sloshing}}{\epsilon} \right) [\%] \quad (6.1)$$

Lordo 1				Lordo 2			
D46 - 45ml				D46 - 50ml			
Poly5 ZV Antislosh		Trapezia STD		Poly5 ZV Antislosh		Trapezia STD	
C_1' [cicli/min]		C_1' [cicli/min]		C_1' [cicli/min]		C_1' [cicli/min]	
	[mg]		[mg]		[mg]		[mg]
Errore totale	-89.96%	Errore totale	ϵ_1	Errore totale	-74.31%	Errore totale	ϵ_2
$(0.875 \cdot C_1')$ [cicli/min]		$(0.875 \cdot C_1')$ [cicli/min]		$(0.875 \cdot C_1')$ [cicli/min]		$(0.875 \cdot C_1')$ [cicli/min]	
	[mg]		[mg]		[mg]		[mg]
Errore totale	-79.57%	Errore totale	37% ϵ_1	Errore totale	-62.41%	Errore totale	71% ϵ_2
$(0.75 \cdot C_1')$ [cicli/min]		$(0.75 \cdot C_1')$ [cicli/min]		$(0.75 \cdot C_1')$ [cicli/min]		$(0.75 \cdot C_1')$ [cicli/min]	
	[mg]		[mg]		[mg]		[mg]
Errore totale	25.09%	Errore totale	8% ϵ_1	Errore totale	4.44%	Errore totale	20% ϵ_2
$(0.625 \cdot C_1')$ [cicli/min]		$(0.625 \cdot C_1')$ [cicli/min]		$(0.625 \cdot C_1')$ [cicli/min]		$(0.625 \cdot C_1')$ [cicli/min]	
	[mg]		[mg]		[mg]		[mg]
Errore totale	49.88%	Errore totale	7% ϵ_1	Errore totale	-16.85%	Errore totale	24% ϵ_2
$(0.5 \cdot C_1')$ [cicli/min]		$(0.5 \cdot C_1')$ [cicli/min]		$(0.5 \cdot C_1')$ [cicli/min]		$(0.5 \cdot C_1')$ [cicli/min]	
	[mg]		[mg]		[mg]		[mg]
Errore totale	9.92%	Errore totale	8% ϵ_1	Errore totale	-37.17%	Errore totale	21% ϵ_2

Figura 6.4: Diminuzione dell'errore totale, rispetto quello ottenuto per la legge standard indicato con ϵ_1 per il riempimento a 45 ml, e con ϵ_2 per quello a 50 ml, per i test di lunga durata del flacone D46 con legge poly 5.

La legge che presenta un errore totale minore è la poly 5 ZV, con la quale si ottiene una riduzione dell'errore di pesatura pari al 71.60 %. Pertanto, i test di lunga durata sono stati effettuati con quest'ultima traiettoria.

In Figura 6.4 sono presentati i risultati dei test per il flacone D46. È indicato con ϵ_1 l'errore di pesatura alla ciclica C_1' per il riempimento a 45 ml, mentre con ϵ_2 quello per il riempimento a 50 ml. Per ogni ciclica, viene poi riportato l'errore di pesatura espresso come riportato in (6.1). Alla ciclica nominale, si può notare come la riduzione dell'errore, pari al 89.96% per il primo dosaggio e 74.31% per il secondo sia simile a quella ottenuta nel primo test. A velocità minori, la riduzione dell'errore non è così evidente, e in alcuni casi si arriva anche a errori maggiori rispetto alla legge standard. Ciò è dovuto al fatto che, a cicliche minori, l'errore di pesatura è molto più contenuto rispetto alla ciclica C_1' , di conseguenza le piccole variazioni sono più evidenti. Perciò, a livello pratico, l'errore di pesatura rispetto il caso standard non varia in modo significativo.

6.2 Risultati per il flacone D49

Le stesse tipologie di prove svolte per il flacone D46 sono state eseguite anche per il D49. In questo caso, i primi test sono stati più lunghi, sia per il numero maggiore di leggi da provare, sia perché sono stati esaminati entrambi i riempimenti. Le leggi testate hanno portato a una visibile riduzione delle oscillazioni in fase di sosta, oltre a un'altezza massima di sloshing più contenuta rispetto alla legge standard.

Dalla prova della legge trapezoidale ZVDD, è emerso che essa risulta la peggiore tra tutte le traiettorie anti-sloshing. In Figura 6.5 è mostrato il confronto con la legge poly

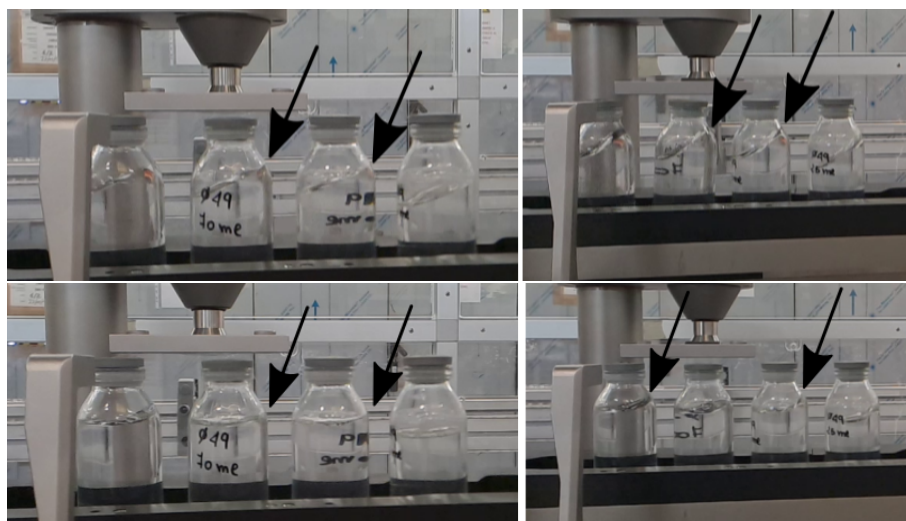


Figura 6.5: Confronto dell'altezza di sloshing tra la legge poly 5 ZV, a sinistra, e la legge trapezoidale ZVDD, a destra, per il flacone D49 riempito a 100 ml alla ciclica C_2 . In alto è mostrata la fase di decelerazione, e in basso la fase di sosta.

D49 - 70ml		D49 - 70ml		D49 - 70ml		D49 - 70ml	
Poly5 ZV Antislosh	Trapezia STD	Poly5 ZV Antislosh	Trapezia STD	Sin ZV Antislosh	Trapezia STD	Sin ZV Antislosh	Trapezia STD
C_2 [cicli/min]		C_2 [cicli/min]		C_2 [cicli/min]		C_2 [cicli/min]	
Media [mg]	Media [mg]	Media [mg]	Media [mg]	Media [mg]	Media [mg]	Media [mg]	Media [mg]
36 /	36 /	36 /	36 /	36 /	36 /	36 /	36 /
Errore totale	Errore totale	Errore totale	Errore tot.	Errore totale	Errore totale	Errore totale	Errore totale
-72.73%	€	-71.33%	€	-62.60%	€	-46.74%	€
D49 - 70ml		D49 - 70ml		D49 - 70ml		D49 - 70ml	
Trap ZV Antislosh	Trapezia STD	Trap ZVD Antislosh	Trapezia STD	Trap ZVDD Antislosh	Trapezia STD	Trap ZVDD Antislosh	Trapezia STD
C_2 [cicli/min]		C_2 [cicli/min]		C_2 [cicli/min]		C_2 [cicli/min]	
Media [mg]	Media [mg]	Media [mg]	Media [mg]	Media [mg]	Media [mg]	Media [mg]	Media [mg]
36 /	36 /	36 /	36 /	36 /	36 /	36 /	36 /
Errore totale	Errore totale	Errore totale	Errore tot.	Errore totale	Errore totale	Errore totale	Errore totale
-49.54%	€	-35.78%	€	-25.08%	€		
D49 - 100ml		D49 - 100ml		D49 - 100ml		D49 - 100ml	
Poly5 ZV Antislosh	Trapezia STD	Poly5 ZVD Antislosh	Trapezia STD	Sin ZV Antislosh	Trapezia STD	Sin ZVD Antislosh	Trapezia STD
C_2 [cicli/min]		C_2 [cicli/min]		C_2 [cicli/min]		C_2 [cicli/min]	
Media [mg]	Media [mg]	Media [mg]	Media [mg]	Media [mg]	Media [mg]	Media [mg]	Media [mg]
36 /	36 /	36 /	36 /	36 /	36 /	36 /	36 /
Errore totale	Errore totale	Errore totale	Errore tot.	Errore totale	Errore totale	Errore totale	Errore totale
-76.97%	€	-71.36%	€	-60.65%	€	-56.43%	€
D49 - 100ml		D49 - 100ml		D49 - 100ml		D49 - 100ml	
Trap ZV Antislosh	Trapezia STD	Trap ZVD Antislosh	Trapezia STD	Trap ZVDD Antislosh	Trapezia STD	Trap ZVDD Antislosh	Trapezia STD
C_2 [cicli/min]		C_2 [cicli/min]		C_2 [cicli/min]		C_2 [cicli/min]	
Media [mg]	Media [mg]	Media [mg]	Media [mg]	Media [mg]	Media [mg]	Media [mg]	Media [mg]
36 /	36 /	36 /	36 /	36 /	36 /	36 /	36 /
Errore totale	Errore totale	Errore totale	Errore tot.	Errore totale	Errore totale	Errore totale	Errore totale
-57.97%	€	-46.64%	€	-34.55%	€		

Figura 6.6: Diminuzione dell'errore totale, rispetto quello ottenuto per la legge standard indicato con €, per il flacone D49 alla ciclica C_2 . I dati sono stati omessi per questioni di riservatezza aziendale.

5 ZV, per il riempimento a 100 ml. Con lo ZVDD, l'altezza di sloshing risulta maggiore sia durante la fase di decelerazione sia nella fase di sosta. È proprio qui che si notano delle oscillazioni residue nel liquido molto più accentuate. Lo *shaper* ZVDD, infatti, è il metodo che determina le accelerazioni del flacone più elevate, oltre a caratterizzarsi per un andamento dell'accelerazione in cui sono presenti le variazioni più brusche.

Successivamente, sono stati presi in esame i dati del controllo peso. La Figura 6.6 mostra le riduzioni percentuali dell'errore totale rispetto a quello della legge trapezoidale

Lordo 1						Lordo 2					
D49 - 70ml						D49 - 100ml					
Poly5 ZV Antislosh		Poly5 ZVD Antislosh		Trapezia STD		Poly5 ZV Antislosh		Poly5 ZVD Antislosh		Trapezia STD	
C_2 [cicli/min]						C_2 [cicli/min]					
	[mg]		[mg]		[mg]		[mg]		[mg]		[mg]
Errore totale	-74.87%	Errore totale	-71.08%	Errore totale	ϵ_1	Errore totale	-78.85%	Errore totale	-73.40%	Errore totale	ϵ_2
(0.857·C2) [cicli/min]						(0.857·C2) [cicli/min]					
Errore totale	-69.37%	Errore totale	-67.30%	Errore totale	$69\% \epsilon_1$	Errore totale	-73.20%	Errore totale	-69.65%	Errore totale	$77\% \epsilon_2$
(0.714·C2) [cicli/min]						(0.714·C2) [cicli/min]					
Errore totale	-36.42%	Errore totale	-14.42%	Errore totale	$31\% \epsilon_1$	Errore totale	-29.63%	Errore totale	-21.63%	Errore totale	$31\% \epsilon_2$
(0.571·C2) [cicli/min]						(0.571·C2) [cicli/min]					
Errore totale	-29.90%	Errore totale	-11.80%	Errore totale	$25\% \epsilon_1$	Errore totale	-21.50%	Errore totale	-1.42%	Errore totale	$23\% \epsilon_2$

Figura 6.7: Diminuzione dell'errore totale, rispetto quello ottenuto per la legge standard indicato con ϵ_1 per il riempimento a 70 ml, e con ϵ_2 per quello a 100 ml, per i test di lunga durata del flacone D49 con leggi poly 5 ZV e ZVD.

standard. Come anticipato dai risultati visivi, anche dal lato del controllo peso, la trapezoidale ZVDD si dimostra essere la meno vantaggiosa. Anche per il flacone D49, la legge più efficace risulta essere la poly 5 ZV. Però, per i test di lunga durata, si è scelto di valutare anche la poly 5 ZVD, dato che la differenza di errore è molto contenuta, soprattutto per il riempimento a 70 ml. I risultati dei test di lunga durata sono riportati in Figura 6.7. La presentazione dei dati è analoga a quella descritta nella Sezione 6.1. Anche nei test con più campioni, la differenza tra il metodo ZV e ZVD è limitata. Tuttavia, anche con questo flacone, la legge migliore risulta essere la poly 5 ZV, ottenendo, alla ciclica nominale C_2 , una riduzione dell'errore di pesatura pari al 74.87% per il riempimento parziale e al 78.85% per il riempimento totale. Anche in questo caso, con cicliche inferiori a quella nominale, si osserva una riduzione dell'errore di pesatura, la quale diventa via via meno evidente diminuendo la velocità di elaborazione dei flaconi.

Capitolo 7

Ottimizzazione di una legge definita a tratti

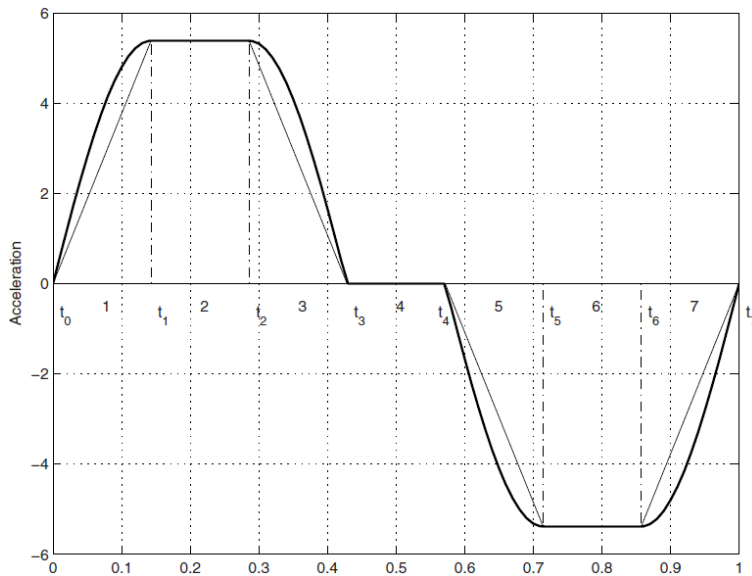


Figura 7.1: Andamento dell'accelerazione per una legge a tratti.

Un'altra metodologia studiata per la generazione di traiettorie anti-sloshing è stata l'ottimizzazione della durata dei tratti da cui è composta una legge di moto, con l'obiettivo di minimizzare l'altezza di sloshing o rientrare in un range prestabilito. Come descritto in [12], è possibile utilizzare un modello di previsione dell'altezza di sloshing su cui basare un problema di ottimizzazione vincolato, per poi calcolare una traiettoria ottimale. Una traiettoria definita a tratti è descritta da diverse porzioni, ognuna delle quali è caratterizzata da una specifica espressione matematica o parametrica, al fine di rispondere alle più molteplici esigenze o specifiche. Invece di avere un'unica equazione che descrive la legge per l'intero percorso, come nel caso della polinomiale di 5° o 7° grado, la legge sarà composta da tratti separati, ciascuno avente le proprie condizioni iniziali. Un esempio di legge di questo tipo è anche la trapezoidale modificata (Sezione 4.2), che è costituita da sei tratti, descritti da diverse funzioni, e le durate dei tratti sono fissate in anticipo ed espresse come frazione del periodo totale della traiettoria.

Poiché una legge a tratti permette la massima flessibilità nella generazione di una traiettoria, si vuole abbandonare la durata dei tratti come dato prestabilito e trovare un

metodo per calcolare la durata ottimale per ciascuna porzione, con lo scopo di soddisfare una determinata condizione. In questa specifica applicazione, tale condizione mira a ridurre il fenomeno dello sloshing all'interno del flacone. In questo studio, è stata utilizzata una traiettoria composta da segmenti con accelerazione costante, congiunti da raccordi espressi attraverso funzioni trigonometriche, come descritto nel libro [4]. Un profilo generico di una legge di questo tipo è mostrato in Figura 7.1. Essa è composta da sette parti, in cui $t_0 = 0, t_1, t_2, \dots, t_7 = t_{\text{finale}}$ rappresentano gli istanti di transizione da un tratto all'altro. Nei segmenti pari (2, 4, 6) si ha accelerazione costante, mentre in quelli dispari (1, 3, 5, 7) l'accelerazione è descritta da una senoide (o cosenoide).

È stata quindi sviluppata una funzione MATLAB che permettesse di calcolare una traiettoria di questo tipo, fornendo come input lo spazio da percorrere e la durata dei sette tratti che la compongono. Successivamente, è stato scritto il programma per il calcolo dei tratti ottimizzati, basato sulla funzione **fmincon**. Questa funzione, in MATLAB, è utilizzata per cercare il minimo in problemi di ottimizzazione vincolati, in generale descritti come:

$$\begin{cases} \min f(x) \\ g_i(x) \leq 0 \text{ con } i = 1, \dots, n \\ h_i(x) = 0 \text{ con } i = 1, \dots, m \end{cases} \quad (7.1)$$

in cui si ha:

- $f(x)$: funzione obiettivo che si desidera minimizzare;;
- $g_i(x)$: funzioni di vincolo di disuguaglianza;
- $h_i(x)$: funzioni di vincolo di uguaglianza;

La funzione da minimizzare (i.e. $f(x)$) prende in input gli istanti di tempo t_1, t_2, \dots, t_7 che definiscono una generica legge di moto trapezia come quella mostrata in Figura 7.1. Come output restituisce il valore massimo dell'altezza di sloshing ottenuto. Ad ogni iterazione dell'ottimizzatore quindi, questa funzione calcola la traiettoria a tratti con i sette valori di istanti datigli in input. Con tale accelerazione risale all'altezza di sloshing, rispetto il pelo libero in condizioni statiche, $\bar{\eta}$ (come descritto nella Sezione 3.2.1), e infine ne restituisce il massimo in valore assoluto. Come valori di primo tentativo sono stati impostati i seguenti valori: $t_1 = 0.01, t_2 = 0.02, t_3 = 0.03, t_4 = 0.04, t_5 = 0.05, t_6 = 0.06, t_7 = 0.07$.

I seguenti vincoli di disuguaglianza sono stati imposti sulle variabili da ottimizzare:

$$\begin{cases} t_0 - t_1 \leq -\Delta \implies t_1 \geq t_0 + \Delta \\ t_1 - t_2 \leq -\Delta \implies t_2 \geq t_1 + \Delta \\ t_2 - t_3 \leq -\Delta \implies t_3 \geq t_2 + \Delta \\ t_4 - t_5 \leq -\Delta \implies t_5 \geq t_4 + \Delta \\ t_5 - t_6 \leq -\Delta \implies t_6 \geq t_5 + \Delta \\ t_6 - t_7 \leq -\Delta \implies t_7 \geq t_6 + \Delta \end{cases} \quad (7.2)$$

Ciò è stato fatto per impedire che un tratto della legge inizi a un tempo maggiore rispetto a quello precedente. Inoltre, è stata inserita una variabile $\Delta = 0.02$ s, cosicché i

segmenti non abbiano una durata troppo breve.

Anche i seguenti vincoli di uguaglianza sono stati imposti:

$$\begin{cases} t_3 - t_4 = 0 \implies t_3 = t_4 \\ t_7 = T_a \end{cases} \quad (7.3)$$

Scrivere $t_3 = t_4$ significa eliminare il quarto segmento della legge, ovvero quello ad accelerazione nulla, poiché, in base a esperienze pregresse risultano essere migliori delle leggi senza tratti ad accelerazione nulla. In questo modo l'accelerazione che subisce il recipiente risulta più bassa e favorisce una diminuzione dell'altezza di sloshing. Mentre il vincolo $t_7 = T_a$ serve a imporre la durata totale della legge, che dev'essere pari al tempo di avanzamento richiesto (descritto nella Sezione 2.2). Infine, è stato imposto un vincolo per limitare l'altezza di sloshing durante la fase di sosta, entro un determinato range δ . Questo è descritto dalla seguente disequazione:

$$h_{\text{sosta}} \leq \delta \implies \max(h_{\text{sosta}}) - \delta \leq 0 \quad (7.4)$$

7.1 Traiettorie generate tramite ottimizzazione

Per i flaconi D46 e D49 sono state impostate tre tipi di ottimizzazione, con differenti funzioni obiettivo e vincoli:

- minimizzazione del valore dell'altezza di sloshing generale, su tutto il ciclo macchina. Sarà indicata con *Ott-1*;
- minimizzazione dell'altezza di sloshing solamente durante la fase di sosta del flacone, con lo scopo di eliminare le oscillazioni residue (come nel caso dell'*input shaping*). Sarà indicata con *Ott-2*;
- minimizzazione dell'altezza di sloshing durante l'avanzamento e imposizione dell'altezza di sloshing durante la fase di sosta entro un certo range δ . Sarà indicata con *Ott-3*;

Le traiettorie ottenute e le relative altezze di sloshing (calcolate con il modello MSD), per il flacone D46 riempito a 50 ml alla ciclica C_1' , sono mostrate in Figura 7.2. Per l'*Ott-1*, è stata ottenuta una minore altezza di sloshing su tutto il ciclo, specialmente per la fase di avanzamento. Mentre per l'*Ott-2*, si nota come si sono cancellate le oscillazioni durante la sosta. Infine, per l'*Ott-3*, in cui è stato imposto che $\delta = 12.3\%h$ (dove h è l'altezza di riempimento, descritta nella Sezione 3.2.1), l'altezza di sloshing viene mantenuta entro questo range durante la sosta e viene anche minimizzata durante l'avanzamento, rispettando i vincoli imposti. In Figura 7.3 sono mostrate le leggi ottenute per il flacone D49, alla ciclica C_2 con riempimento a 100 ml. Le considerazioni sono analoghe al flacone D46, a parte per l'*Ott-3*, in cui è stato imposto $\delta = 7.1\%h$. Si ricorda che tale flacone con riempimento a 70 ml è soggetto alla stessa legge di moto del 100 ml, perciò le leggi ottimizzate sono le medesime. Per verificare il comportamento del liquido sono state effettuate delle simulazioni CFD. I grafici ottenuti per l'altezza di sloshing e le forze rilevate dal CFD durante il moto, sono stati confrontati con i dati ottenuti tramite MATLAB. Il risultato di questo confronto per i vari flaconi e riempimenti è visibile nelle Figure 7.4, 7.5 e 7.6. Per il flacone D46 (Figura 7.4), per l'*Ott-1* si nota una significativa differenza sull'altezza di sloshing tra i due modelli. Nel

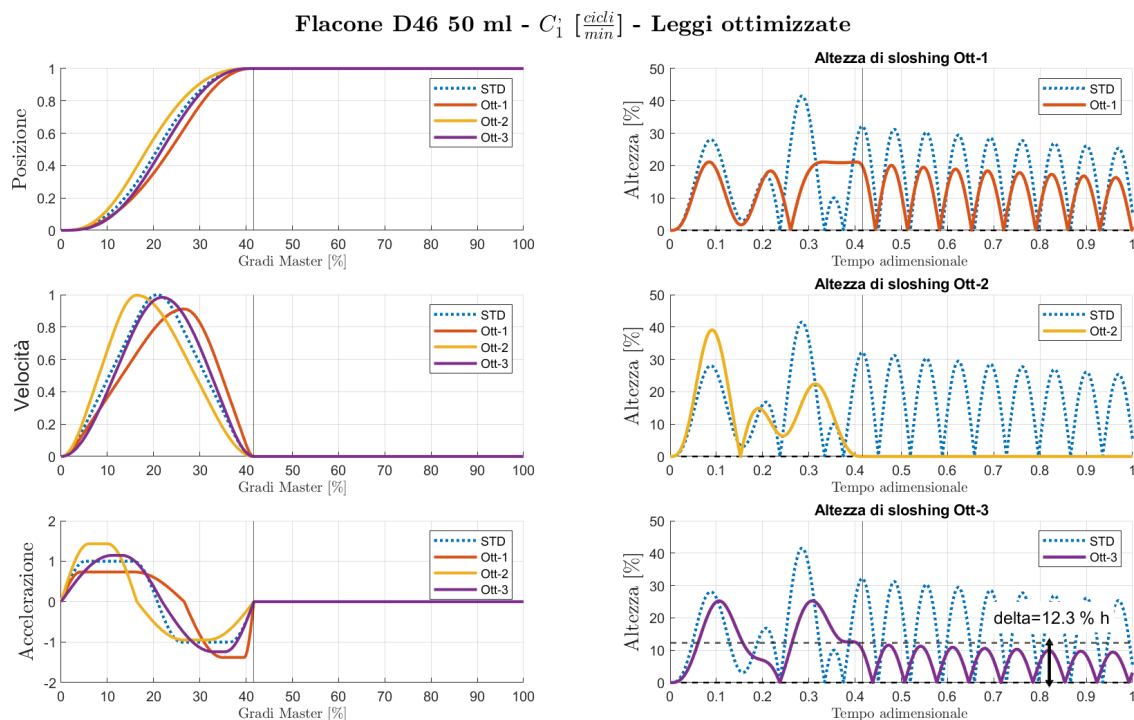


Figura 7.2: Grafici relativi all'applicazione dell'ottimizzatore alla legge a tratti, e comparazione con la legge trapezoidale standard, per il flacone D46.

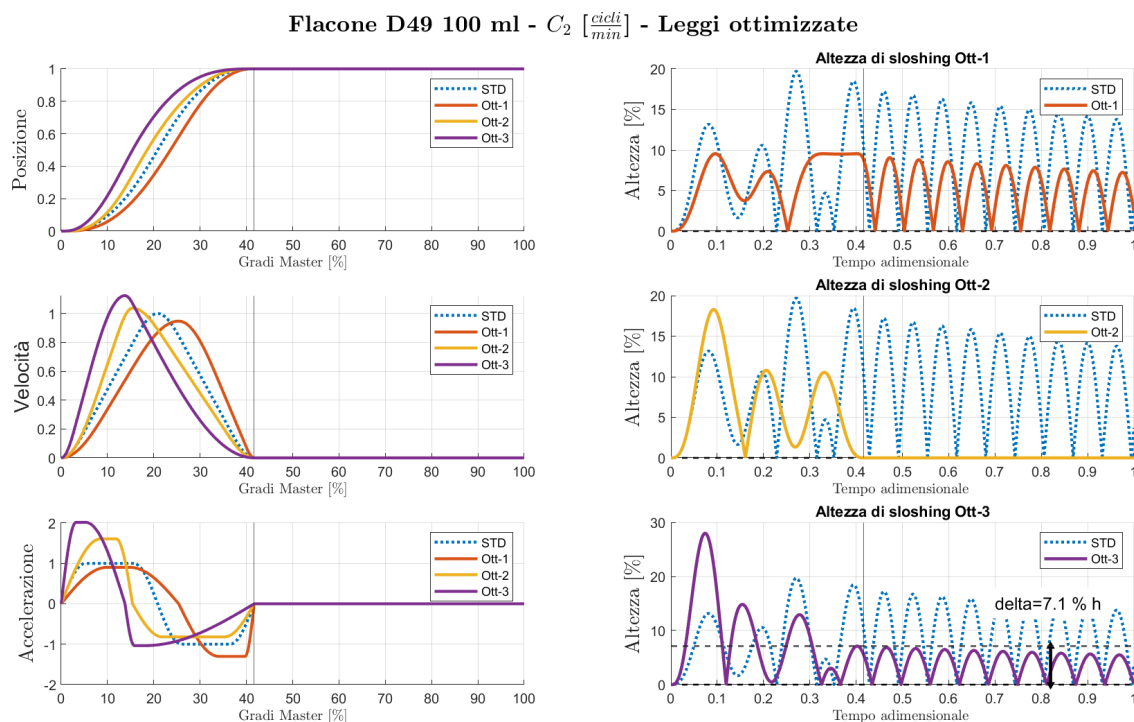


Figura 7.3: Grafici relativi all'applicazione dell'ottimizzatore alla legge a tratti, e comparazione con la legge trapezoidale standard, per il flacone D49 riempito a 100 ml.

caso del *Ott-2*, si osserva una riduzione delle oscillazioni residue, sebbene esse risultino comunque più ampie rispetto a quelle ottenute con la legge poly 5 ZV (visibile in Figura 5.7). Analogamente, per l'*Ott-3*, non emergono particolari miglioramenti. Per il flacone D49 riempito a 100 ml (Figura 7.5), l'andamento dei due modelli dell'altezza di sloshing risulta abbastanza simile per tutte e tre le ottimizzazioni. Inoltre, l'altezza ot-

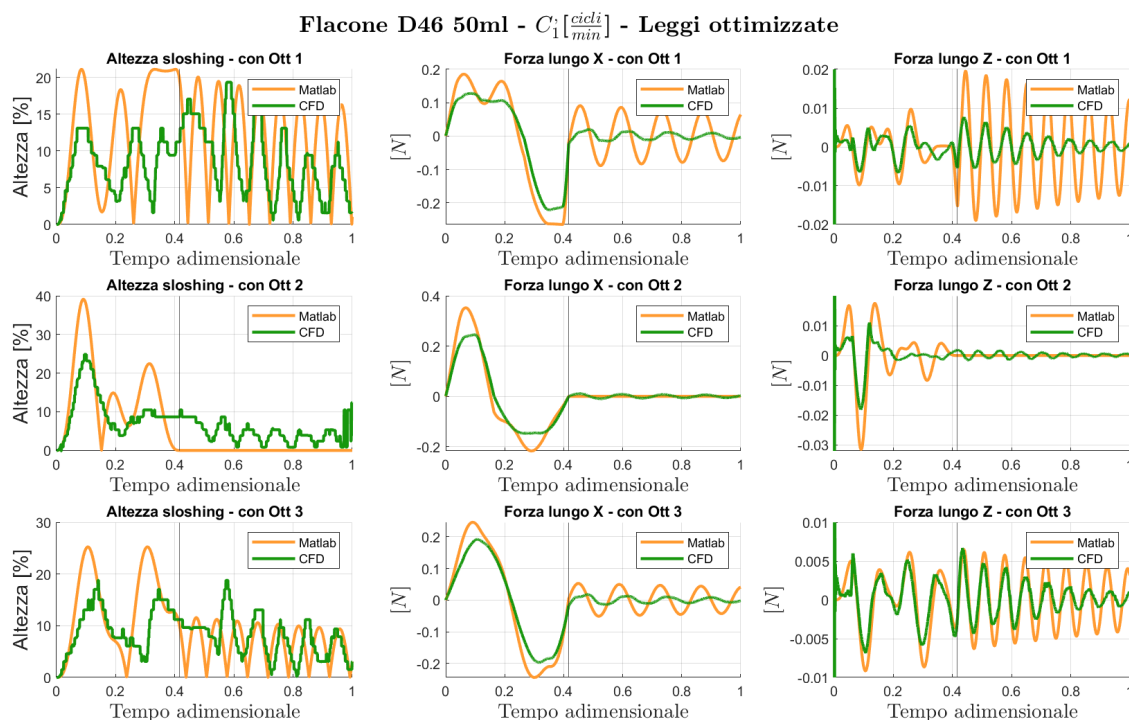


Figura 7.4: Confronto tra risultati MATLAB e risultati CFD per il flacone D46, alla ciclica C_1 , e riempimento 50 ml.

tenuta in fase di sosta per l'*Ott-2* e l'*Ott-3* è comparabile a quella ottenuta con la poly 5 ZV (Figura 5.8), nonostante un'altezza maggiore in fase di avanzamento. Per il flacone D49 riempito a 70 ml (Figura 7.6), le altezze di sloshing ottenute con i due modelli sono praticamente sovrapponibili per tutte e tre le ottimizzazioni, in quanto con questo riempimento il liquido si mantiene nella parte cilindrica del riempimento. Complessivamente, per tutti i casi analizzati, il comportamento del liquido è risultato conforme ai vincoli definiti in fase di generazione delle traiettorie a tratti. Infine, relativamente alle forze, sempre nelle Figure 7.4, 7.5 e 7.6, i valori ottenuti dal modello MATLAB e da quello CFD risultano prossimi tra di loro, confermando la validità dell'approssimazione tramite modello MSD, già descritta nella Sezione 5.3. Anche se non è stato possibile condurre dei test sperimentali sul muletto della *SMART 300* per queste leggi, l'analisi CFD delle traiettorie ottimizzate ha confermato la validità di tali leggi per il loro impiego nel controllo dello sloshing di un liquido all'interno di un recipiente. L'utilizzo di leggi definite a tratti consente di risolvere un problema di ottimizzazione, mirato a determinare le durate dei singoli segmenti, al fine di rispettare vincoli specifici, in questo caso, imposti sull'altezza di sloshing.

Facendo uso di un programma MATLAB dedicato per l'implementazione e la risoluzione di questo problema, è possibile ottenere in pochi minuti le durate ottimizzate. Questo permette di migliorare il comportamento del liquido nel flacone intervenendo unicamente sulla durata dei tratti, evitando quindi altre modifiche alla traiettoria.

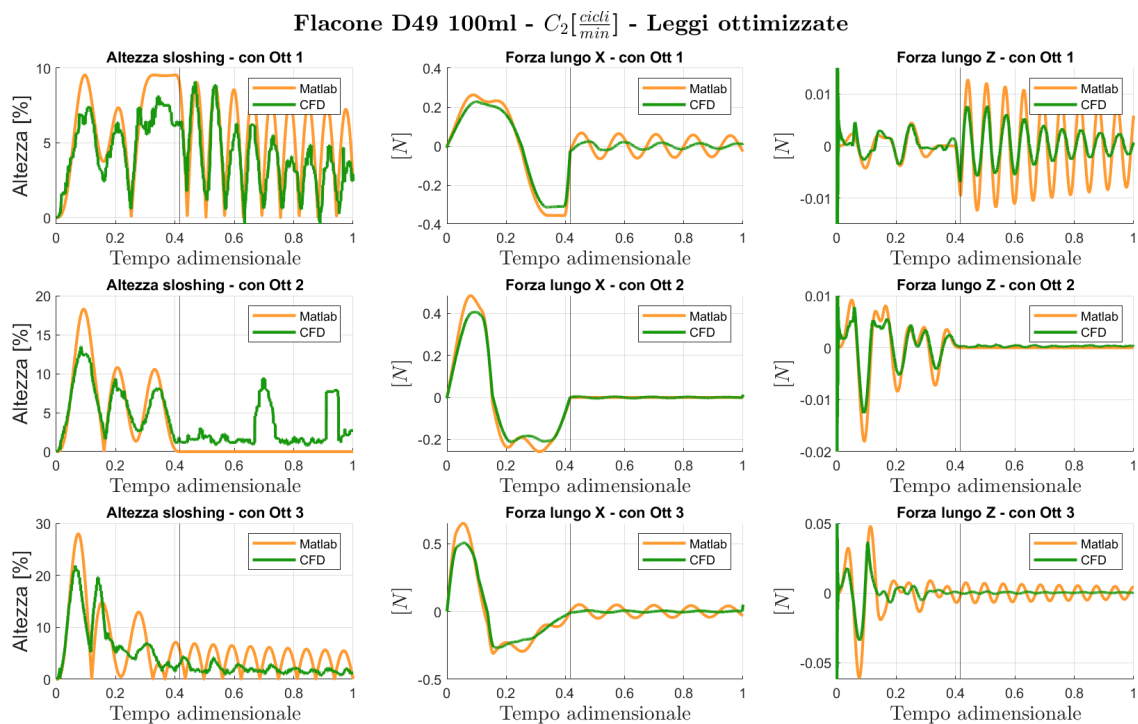


Figura 7.5: Confronto tra risultati MATLAB e risultati CFD per il flacone D49, alla ciclica C_2 e riempimento 100 ml.

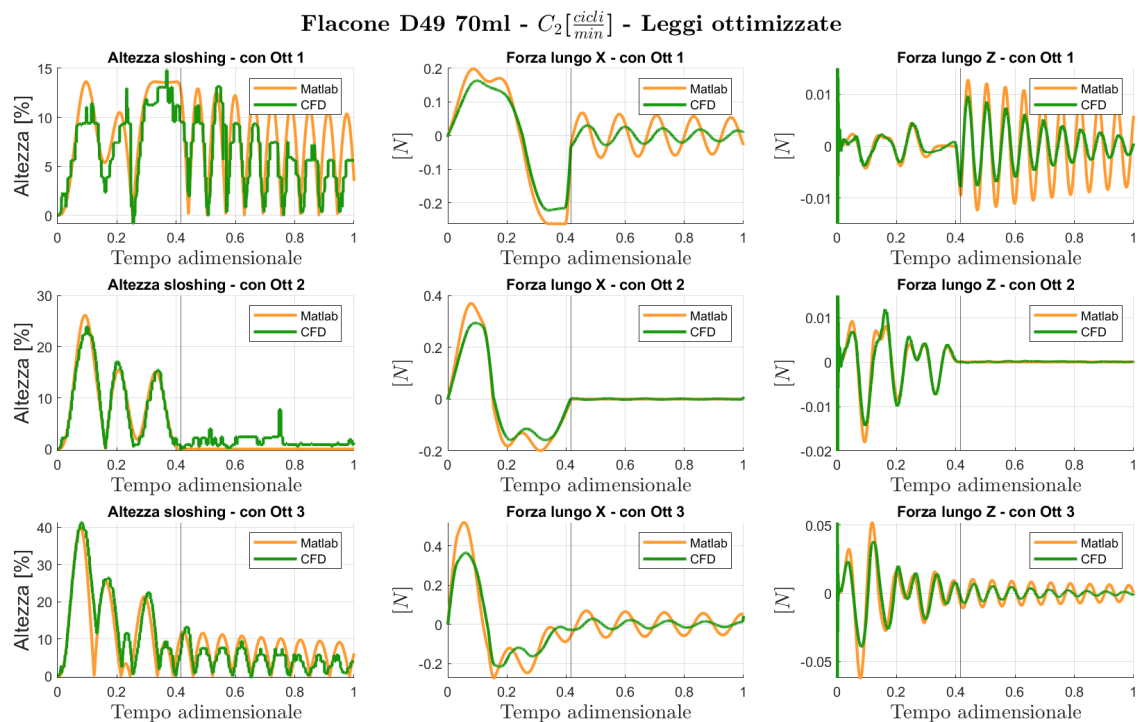


Figura 7.6: Confronto tra risultati MATLAB e risultati CFD per il flacone D49, alla ciclica C_2 e riempimento 70 ml.

Capitolo 8

Conclusioni

Durante questo studio, svolto presso IMA *Life*, il modello per la stima dell'altezza di sloshing presentato in [2] è stato impiegato per validare il moto del liquido all'interno di flaconi trasportati da una slitta lineare all'interno della macchina *SMART 300*. Al fine di limitare l'altezza di sloshing e dei fenomeni indesiderati che ne derivano durante il moto, sono state implementate diverse tecniche.

In prima battuta, l'applicazione del metodo *input shaping* alla traiettoria del pettine, utilizzato per la movimentazione di flaconi, ha consentito di ottenere significativi miglioramenti riguardo allo sloshing del liquido. Con l'implementazione della legge poly 5 ZV sulla macchina *SMART 300*, è stato possibile ridurre l'altezza massima di sloshing, come evidenziato innanzitutto dalle simulazioni CFD. Rispetto alla legge standard, questa traiettoria anti-sloshing permette di limitare le oscillazioni residue in fase di sosta, come riscontrato dai dati provenienti dalle bilance.

Nel caso del flacone D46, per cui si è passati ad una ciclica C'_1 , si registra una riduzione dell'errore di pesatura del 89.96 % per il riempimento a 45 ml e del 74.31 % per il riempimento a 50 ml. Anche nel caso del flacone D49, alla ciclica C_2 , si osserva una significativa riduzione dell'errore, pari al 74.87 % per il riempimento a 70 ml e al 78.85% per il riempimento a 100 ml. In questo modo, viene migliorato non solo il controllo peso del prodotto finale, ma anche quello del riempimento parziale, contribuendo a perfezionare l'accuratezza del secondo dosaggio. Inoltre, poiché l'accuratezza del controllo peso aumenta, è possibile ridurre il numero degli scarti causati da un eventuale sovradosaggio.

È da sottolineare che tali risultati sono stati ottenuti utilizzando acqua, ma tale metodo può essere applicato a qualsiasi liquido, previa conoscenza delle sue caratteristiche, quali densità e viscosità.

Dagli esiti delle analisi CFD, è emerso che il modello MSD, impiegato per semplificare il fenomeno dello sloshing con un sistema massa-molla-smorzatore, è in grado di prevedere in maniera accurata sia l'altezza di sloshing sia le forze in gioco durante il movimento del liquido all'interno del flacone. Come applicazione futura, ci si propone di eseguire nuovi test sperimentali, per completare la validazione del modello. Inoltre, al fine di condurre un confronto completo tra caso reale, modello CFD e modello MSD, sarebbe opportuno esplorare le modalità di rilevamento delle forze in gioco durante il moto del flacone in macchina.

Il secondo metodo proposto per la limitazione dell'altezza di sloshing riguarda l'ottimizzazione vincolata di leggi trapezoidali modificate. Queste leggi sono particolarmente interessanti per la massima flessibilità nella scelta dei vincoli e la loro facilità

di applicazione dal punto di vista industriale, poiché è sufficiente assegnare la durata dei vari tratti in fase di progettazione della legge. In questo modo, ottimizzando la durata dei tratti della trapezoidale per rispettare i vincoli sull'altezza di sloshing, le simulazioni CFD mostrano risultati positivi. Tuttavia, in futuro, sarà essenziale testare approfonditamente tali leggi su un banco prova, in modo da verificare la bontà del metodo e confrontarla con la tecnica dell'*input shaping*.

Appendice A

Scheda tecnica bilancia Wipotec SL-M 250/300-FS

18 SL-M-FS - GAMMA DI PESATURA 0-1.000 g

WIPOTEC WEIGHING TECHNOLOGY

VERSIONE DELLA CELLA DI PESATURA	SL-M 20/50-FS	SL-M 50/50-FS	SL-M 100/150-FS	SL-M 250/300-FS	SL-M 500/300-FS	SL-M 1000/600-FS
Gamma di pesatura	20 g	50 g	100 g	250 g	500 g	1.000 g
Gamma di precarico impostabile elettricamente	50 g	50 g	150 g	300 g	300 g	600 g
Risoluzione (d)	0,0002 g	0,0005 g	0,001 g	0,002 g	0,005 g	0,01 g
Risoluzione con convertitore ad alta risoluzione (opzione) ²	0,00005 g	0,0001 g	0,0002 g	0,0005 g	0,001 g	0,002 g
Risoluzione con convertitore ad alta risoluzione con MMS e AVC ³	0,0001 g	0,0002 g	0,0005 g	0,001 g	0,002 g	0,005 g
Linearietà \leq	$\pm 0,0001$ g	$\pm 0,0002$ g	$\pm 0,0004$ g	$\pm 0,001$ g	$\pm 0,002$ g	$\pm 0,004$ g
Ripetibilità \leq ¹	0,00005 g	0,0001 g	0,0002 g	0,0005 g	0,001 g	0,002 g
Ripetibilità \leq ¹ con MMS e AVC	0,0001 g	0,0002 g	0,0005 g	0,001 g	0,002 g	0,005 g
Diametro massimo del piattello di pesatura	40 mm	40 mm	40 mm	40 mm	80 mm	80 mm
Tempo di assetamento ^{1,2} (all'1% del valore finale di fondo scala)	< 120 ms					
Grado di protezione della cella di pesatura	IP44 / IP65 ⁴					
Gamma di temperatura	da +5 °C a +40 °C					
Alimentazione contenitore per l'elettronica ⁵	24 V DC, $\pm 5\%$, 0,5 A					
Peso	ca. 1.000 g					
Interfaccia 1	CAN, RS 422, Profibus DP, Profinet IO, Ethernet/IP, EtherCAT					
Interfaccia 2	RS 232, 115200/8/1/dispari					
Materiale del contenitore	Alluminio anodizzato e piastre laterali in acciaio inossidabile AISI 304 Opzione: acciaio inossidabile AISI 316L					

¹ In base ai parametri di regolazione e alle condizioni di installazione e ambientali del sistema | La ripetibilità assoluta è pari a +/- 3 s

² Tempo di pesatura = tempo di assetamento più tempo di misurazione (regolabile)

³ Gamma di temperatura: da +10 °C a +30 °C

⁴ Grado di protezione IP65 con l'opzione di protezione per lavaggio

⁵ Cavo di connessione tra il sensore e il contenitore separato per l'elettronica di 5 metri

/ OPZIONI

- **Opzione 9:** Contenitore in acciaio inossidabile
- **Opzione 10:** RS 422 anziché interfaccia CAN
- **Opzione 11:** Indirizzamento via bus (standard)
- **Opzione 12:** Convertitore A/D ad alta risoluzione
- **Opzione 13:** I/O digitali (standard)
- **Opzione 14:** Algoritmo di dosaggio
- **Opzione 25:** Compensazione del precarico
- **Opzione 29:** Sistema di protezione per lavaggio IP65 (per la versione in alluminio solo unitamente a copertura/carter d'acciaio inossidabile a cura dell'utilizzatore)
- **Opzione 34:** Connessione al contenitore separato per l'elettronica sotto la base della cella (di serie per la versione con contenitore in acciaio inossidabile)
- **Opzione 35:** Profibus DP anziché interfaccia CAN
- **Opzione 36:** Ethernet/IP anziché interfaccia CAN
- **Opzione 37:** Profinet IO anziché interfaccia CAN
- **Opzione 38:** EtherCAT anziché interfaccia CAN
- **Opzione 39:** Powerlink (solo con MMS)
- **Opzione 40:** Flange di fissaggio in basso (solo per la versione in alluminio)
- **Opzione 41:** Flange di fissaggio in alto (solo per la versione in alluminio)
- **Opzione 42:** Installazione capovolta
- **Opzione 44:** Self Check (peso di verifica interno)

Figura A.1: Scheda tecnica bilancia Wipotec SL-M 250/300-FS

Ringraziamenti

Conclusa questa tesi, giunge al termine anche questo percorso universitario. Desidero esprimere la mia gratitudine a tutte le persone che mi hanno accompagnato in questi ultimi anni. Innanzitutto, desidero ringraziare coloro che ha avuto un ruolo diretto nella realizzazione di questo lavoro. Un ringraziamento all'azienda IMA *Life* per avermi fornito l'opportunità di condurre questa ricerca. Un ringraziamento particolare va ai tutor, sia accademici che aziendali, per le loro competenze e per il costante sostegno. Infine, vorrei ringraziare il Prof. Ing. Marco Carricato per il suo feedback costruttivo e per avermi ispirato fin dalle prime lezioni di meccanica applicata.

Un ringraziamento speciale va ai miei genitori, Maurizio e Rosanna, per il loro costante supporto e fiducia delle mie scelte.

Grazie ad Emma, per aver creduto in me e per tutti i bei momenti che passiamo insieme.

Grazie agli amici di Pieve: Matteo, Enrico, Lorenzo F, Samuel, Lorenzo P, Lorenzo B., Riccardo e Filippo, con i quali condivido i ricordi di una vita.

Grazie a tutte le persone che hanno fatto parte di questo percorso di studi, in particolare a Luigi, Matteo, Enrico, Andrea, Diego, e Francesco, compagni di studio, di serate e di tutti i momenti di spensieratezza vissuti in questi anni a Bologna.

Elenco delle figure

2.1	Macchina <i>SMART 300</i>	11
2.2	Sistema di movimentazione con pettine e sistema dosaggio tramite ugelli.	12
2.3	Layout in pianta della macchina <i>SMART 300</i> , in cui si possono osservare i vari membri. È anche presente il sistema di riferimento con gli assi <i>X, Y</i> e <i>Z</i>	12
2.4	Alimentazione flaconi, a sinistra la giostra rotante e a destra la stella a settori.	13
2.5	Dettaglio del riempimento dei flaconi.	14
2.6	Giostra di tappatura.	14
2.7	Grafici normalizzati relativi alla legge di moto standard del pettine per un ciclo, lungo l'asse <i>X</i>	16
2.8	Grafici normalizzati relativi alla legge di moto standard del flacone per un ciclo, lungo l'asse <i>X</i>	16
2.9	A sinistra il flacone <i>D46</i> e a destra il flacone <i>D49</i>	17
3.1	Oscillazione del liquido in movimento in un recipiente cilindrico, da [6].	19
3.2	Simulazione CFD dello sloshing di un combustibile liquido all'interno di un'autocisterna, da [7]. Le forze e momenti idrodinamici causati dalle oscillazioni del liquido modificano la stabilità e il controllo del veicolo, soprattutto durante frenate o sterzate.	20
3.3	Sloshing nel flacone <i>D46</i> con legge di moto standard, alla ciclica C_1 con riempimento a 50 ml. A sinistra la fase di accelerazione, dove si può notare che il liquido arriva alla bocca del flacone. Al centro la fase di decelerazione in cui si osserva la fuoruscita di gocce. A destra, durante la fase di sosta, si può vedere l'oscillazione del liquido.	21
3.4	Sloshing nel flacone <i>D49</i> durante la fase di sosta con legge di moto standard, alla ciclica C_2 : a sinistra con riempimento a 70 ml, mentre a destra con 100 ml.	21
3.5	Modello del pendolo.	22
3.6	Modello massa-molla-smorzatore.	22
3.7	In alto il grafico dell'accelerazione, con legge standard data al flacone, rapportata al valore suo valore massimo. In basso il grafico relativo all'altezza dello sloshing, riportata in percentuale rispetto all'altezza del pelo libero in condizioni stazionarie.	24
4.1	Risposta del sistema $D(s)$ (4.1) all'impulso di Dirac e cancellazione delle vibrazioni con due impulsi.	27

4.2	Percentuale delle vibrazioni residue, in un sistema non smorzato ($\delta = 0$), con metodi ZV (linea tratto-punto), ZVD (linea tratteggiata) e ZVDD (linea continua).	29
4.3	Percentuale delle vibrazioni residue con metodo ZVDD, in un sistema smorzato, con diversi valori di δ : $\delta = 0$ (linea a punti), $\delta = 0.2$ (linea tratto-punto), $\delta = 0.4$ (linea tratteggiata), $\delta = 0.6$ (linea continua).	29
4.4	Grafici per la legge trapezoidale modificata.	31
4.5	Grafici per la legge sinusoidale modificata.	31
4.6	Grafici per la legge poly 5.	32
4.7	Grafici per la legge poly 7.	32
4.8	Grafici dei risultati relativi all'applicazione dello <i>shaper</i> ZV alla legge di moto trapezoidale modificata. In blu la legge standard, ed in rosso la legge ottenuta con lo <i>shaper</i> che presenta un ritardo di $T_0/2$. Sulla sinistra si hanno i grafici di posizione, velocità e accelerazione, rapportati al valore massimo. Sulla destra, la relativa l'altezza di sloshing ottenuta dall'applicazione delle due leggi al modello MSD.	34
4.9	Legge di moto trapezoidale modificata, a cui è stato applicato il metodo ZV (in rosso) e la legge standard previa applicazione dello <i>shaper</i> (in blu).	35
4.10	Grafico dell'altezza di sloshing per il flacone D46 con riempimento a 50 ml, in blu la risposta del sistema con legge standard, in rosso quella ottenuta applicando lo ZV, entrambe con durata complessiva pari a T_a	35
4.11	Grafici relativi all'applicazione dell' <i>input shaping</i> alla legge trapezoidale modificata, e comparazione con la legge standard, per il flacone D46 alla ciclica C_1 . Per i grafici della traiettoria, è stata messa in evidenza la parte relativa all'avanzamento.	36
4.12	Grafici relativi all'applicazione dell' <i>input shaping</i> alla legge poly 5, e comparazione con la legge standard, per il flacone D49 alla ciclica C_2 . Per i grafici della traiettoria, è stata messa in evidenza la parte relativa all'avanzamento.	36
5.1	Sezione del modello 3D del flacone D46, in arancione si può notare la parte interna necessaria per la simulazione CFD.	39
5.2	A sinistra la regione <i>Inlet</i> , mentre a destra la regione <i>Walls</i> , per il flacone D46.	39
5.3	A sinistra la mesh generata per il flacone D46, è ben visibile l'infittimento della griglia in corrispondenza del pelo libero. A destra il riempimento a 50 ml.	40
5.4	A sinistra la simulazione CFD, alla ciclica C_1 , della legge poly 5 ZV, e a destra, la legge sinusoidale ZV, riportate allo stesso istante per il flacone D46. In quest'ultimo caso, il liquido raggiunge un'altezza maggiore.	42
5.5	A sinistra la simulazione CFD, alla ciclica C_2 della legge trapezoidale ZV, e a destra, la legge trapezoidale ZVDD, riportate allo stesso istante per il flacone D49.	42
5.6	Confronto tra risultati MATLAB e risultati CFD per il flacone D46, alla ciclica C_1 e riempimento 50 ml.	45
5.7	Confronto tra risultati MATLAB e risultati CFD per il flacone D46, alla ciclica C'_1 e riempimento 50 ml.	46

5.8	Confronto tra risultati MATLAB e risultati CFD per il flacone D49, alla ciclica C_2 e riempimento 100 ml.	47
5.9	Confronto tra risultati MATLAB e risultati CFD per il flacone D49, alla ciclica C_2 e riempimento 70 ml.	48
6.1	Confronto dell'altezza di sloshing per il flacone D46, alla ciclica C_1 . In alto la legge standard ed in basso la legge trapezoidale ZV.	50
6.2	Confronto delle oscillazioni residue per il flacone D46, alla ciclica C'_1 , durante la fase di sosta. In alto la legge standard ed in basso la legge poly 5 ZV.	51
6.3	Diminuzione dell'errore totale, rispetto quello ottenuto per la legge standard indicato con ϵ , per il flacone D46 riempito con 50 ml alla ciclica C'_1 . I dati sono stati omessi per questioni di riservatezza aziendale.	51
6.4	Diminuzione dell'errore totale, rispetto quello ottenuto per la legge standard indicato con ϵ_1 per il riempimento a 45 ml, e con ϵ_2 per quello a 50 ml, per i test di lunga durata del flacone D46 con legge poly 5.	52
6.5	Confronto dell'altezza di sloshing tra la legge poly 5 ZV, a sinistra, e la legge trapezoidale ZVDD, a destra, per il flacone D49 riempito a 100 ml alla ciclica C_2 . In alto è mostrata la fase di decelerazione, e in basso la fase di sosta.	53
6.6	Diminuzione dell'errore totale, rispetto quello ottenuto per la legge standard indicato con ϵ , per il flacone D49 alla ciclica C_2 . I dati sono stati omessi per questioni di riservatezza aziendale.	53
6.7	Diminuzione dell'errore totale, rispetto quello ottenuto per la legge standard indicato con ϵ_1 per il riempimento a 70 ml, e con ϵ_2 per quello a 100 ml, per i test di lunga durata del flacone D49 con leggi poly 5 ZV e ZVD.	54
7.1	Andamento dell'accelerazione per una legge a tratti.	55
7.2	Grafici relativi all'applicazione dell'ottimizzatore alla legge a tratti, e comparazione con la legge trapezoidale standard, per il flacone D46.	58
7.3	Grafici relativi all'applicazione dell'ottimizzatore alla legge a tratti, e comparazione con la legge trapezoidale standard, per il flacone D49 riempito a 100 ml.	58
7.4	Confronto tra risultati MATLAB e risultati CFD per il flacone D46, alla ciclica C_1 , e riempimento 50 ml.	59
7.5	Confronto tra risultati MATLAB e risultati CFD per il flacone D49, alla ciclica C_2 e riempimento 100 ml.	60
7.6	Confronto tra risultati MATLAB e risultati CFD per il flacone D49, alla ciclica C_2 e riempimento 70 ml.	60
A.1	Scheda tecnica bilancia Wipotec SL-M 250/300-FS	63

Bibliografia

- [1] R. A. Ibrahim, *Liquid sloshing dynamics: theory and applications*. Cambridge University Press, 2005.
- [2] L. Guagliumi, A. Berti, E. Monti, and M. Carricato, “A simple model-based method for sloshing estimation in liquid transfer in automatic machines,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 129347–129357, 2021.
- [3] R. Di Leva, M. Carricato, H. Gattringer, and A. Müller, “Sloshing dynamics estimation for liquid-filled containers performing 3-dimensional motions: modeling and experimental validation,” *Multibody System Dynamics*, vol. 56, no. 2, pp. 153–171, 2022.
- [4] L. Biagiotti and C. Melchiorri, *Trajectory planning for automatic machines and robots*. Springer Science & Business Media, 2008.
- [5] L. Guagliumi, A. Berti, E. Monti, and M. Carricato, “Antisloshing trajectories for high-acceleration motions in automatic machines,” *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 144, no. 7, p. 071006, 2022.
- [6] H. N. Abramson, “The dynamic behavior of liquids in moving containers, with applications to space vehicle technology,” tech. rep., 1966.
- [7] “Diesel/liquid sloshing in a tank truck simulation.” <https://siamagazin.com/diesel-liquid-sloshing-in-a-tank-truck-simulation/>.
- [8] H. F. Bauer, “Tables of zeros of cross product bessel functions,” *J. Math. Comput.*, vol. 18, pp. 128–135, 1964.
- [9] N. C. Singer and W. P. Seering, “Preshaping Command Inputs to Reduce System Vibration,” *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 112, pp. 76–82, 03 1990.
- [10] R. Löhner, *Applied computational fluid dynamics techniques: an introduction based on finite element methods*. John Wiley & Sons, 2008.
- [11] K. G. Powell, P. L. Roe, and J. Quirk, “Adaptive-mesh algorithms for computational fluid dynamics,” in *Algorithmic trends in computational fluid dynamics*, pp. 303–337, Springer, 1993.
- [12] R. Di Leva, M. Carricato, H. Gattringer, and A. Müller, “Time-optimal trajectory planning for anti-sloshing 2-dimensional motions of an industrial robot,” in *2021 20th International Conference on Advanced Robotics (ICAR)*, pp. 32–37, IEEE, 2021.