

POLITECNICO DI MILANO

Facoltà di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Aeronautica



**STUDIO SUI FENOMENI DI SLOSHING NELLE RIEMPITRICI
INDUSTRIALI**

Relatore: Prof. Maurizio BOFFADOSSI

Tutor Aziendale: Ing. Massimo NASCIMBENI

Tesi di Laurea di:

Andrea PIAZZA Matr.764320

Anno Accademico 2012 - 2013

INDICE

SOMMARIO.....	8
1 INTRODUZIONE.....	10
1.1 EUROTRONICA FM-C	13
1.2 TRASFERIMENTO BOTTIGLIE	30
2 SLOSHING.....	37
2.1 EQUAZIONI FLUIDODINAMICHE	41
2.1.1 DINAMICA DEL FLUIDO	41
2.1.2 FLUIDO DINAMICA COMPUTAZIONALE	45
2.1.3 MODELIZZAZIONE PELO LIBERO	48
2.2 MODELLO CFD.....	51
2.2.1 MODELLO 2D.....	52
3 VALIDAZIONE MODELLO CFD	56
3.1 VALIDAZIONE STATICA E DINAMICA.....	61
3.1.1 VALIDAZIONE STATICA.....	61
3.1.2 VALIDAZIONE DINAMICA.....	66
4 STUDIO PARAMETRICO	82
4.1 SIMULAZIONI.....	87
4.2 ANALISI RISULTATI.....	89
5 CONCLUSIONI	100
BIBLIOGRAFIA.....	106

Indice delle Figure

Figura 1 EUOTRONICA FM-C.....	13
Figura 2 Macrofasi.....	14
Figura 3 COMBI.....	15
Figura 4 Schema Macchina.....	16
Figura 5 Carosello Riempitrice.....	17
Figura 6 Collettore Superiore.....	18
Figura 7 Collettore Inferiore.....	18
Figura 8 Valvola Riempimento.....	19
Figura 9 Flussimetro Magnetico.....	20
Figura 10 Controllo Valvole.....	21
Figura 11 Fase1.....	22
Figura 12 Fase2.....	22
Figura 13 Fase3.....	23
Figura 14 Fase4.....	23
Figura 15 Fase4 finale.....	24
Figura 16 Serbatoio.....	24
Figura 17 Fase5.....	25
Figura 18 Fase6.....	25
Figura 19 Lavaggio.....	26
Figura 20 Tappatore.....	27
Figura 21 Tappatore dettaglio.....	27
Figura 22 Basamento.....	28
Figura 23 Movimentazione dettagli.....	29
Figura 24 Handling bottiglie.....	30
Figura 25 Percorso Bottiglie.....	31
Figura 26 Configurazioni Stelle Trasferimento.....	32
Figura 27 Pinza.....	33
Figura 28 Pinze Soprabaga/Sottobaga.....	33
Figura 29 Dettaglio Baga.....	34
Figura 30 Spaccato Pinza.....	34
Figura 31 Scambio Bottiglia.....	35
Figura 32 Scambio Bottiglia.....	36
Figura 33 Scambi.....	38
Figura 34 Forza Centrifuga.....	39
Figura 35 Inclinazione Pelo libero.....	40
Figura 36 Confronto 3D/2D.....	51

Figura 37 Confronto Mesh 3D/2D.....	51
Figura 38 Dettaglio Mesh	52
Figura 39 Impostazioni CFD.....	53
Figura 40 Confronto Fill Level.....	54
Figura 41 Andamento Forza Centrifuga	55
Figura 42 Sensori di Pressione.....	57
Figura 43 Sensore Capacitivo	58
Figura 44 Misura a Contatti Elettrici	59
Figura 45 Sensore Laser	59
Figura 46 Banco Rotativo	62
Figura 47 Dettagli Banco Rotativo	62
Figura 48 Inclinazione Bottiglia in Rotazione	63
Figura 49 Confronto Inclinazioni.....	63
Figura 50 Inclinazione Bottiglia Ferma.....	63
Figura 51 Validazione Caso 2.....	64
Figura 52 Validazione Caso 1	64
Figura 53 Validazione Caso 3.....	64
Figura 54 Banco Rotativo 4 Stelle	66
Figura 55 Modello CAD Banco con Scambi.....	67
Figura 56 Modello CAD supporto Telecamera	68
Figura 57 Snapshot Caso 2	69
Figura 58 Snapshot Caso 3	70
Figura 59 Parametri Angolari.....	71
Figura 60 Andamento Angolo Alpha ed Inversione Forza Centrifuga.....	73
Figura 61 Validazione dinamica. Caso 1	74
Figura 62 Validazione dinamica. Caso 2.....	75
Figura 63 Validazione dinamica. Caso 3.....	76
Figura 64 Validazione dinamica. Caso 4.....	77
Figura 65 Passo	83
Figura 66 Fill Level.....	83
Figura 67 Bottiglia Analisi.....	86
Figura 68 Monitor Fuoriuscita Liquido.....	89
Figura 69 Raccolta Dati Normalizzati	90
Figura 70 Residui.....	95
Figura 71 Contour Plot	96
Figura 72 Contour Plot 1	97
Figura 73 Contour Plot 2	98
Figura 74 Contour Plot 3	99
Figura 75 Bottiglia Parametri Rotativi.....	102

Figura 76 Bottiglia Studio Parametrico	102
Figura 77 Scambio Errato	104

Indice delle Tabelle

Tabella 1 Validazione Statica	65
Tabella 2 Condizioni Test Validazione Dinamica.....	70
Tabella 3 Parametri Rotativi	72
Tabella 4 Validazione Dinamica 1	78
Tabella 5 Validazione Dinamica 2	79
Tabella 6 Velocità rotazione & numero pinze	85
Tabella 7 Analisi DOE Full Factorial.....	88
Tabella 8 Coefficienti Regressione Iniziale	91
Tabella 9 P-Value 1	92
Tabella 10 P-Value Iterativi	94
Tabella 11 Coefficienti Regressione Finali.....	94

SOMMARIO

Lo studio svolto in questa tesi è rivolto all'indagine delle problematiche di "sloshing" all'interno del processo di riempimento industriale.

Con il termine "sloshing" si identifica un' ampia gamma di fenomeni dove è implicata la dinamica del pelo libero in un fluido.

Nella prima parte della tesi viene fornita una descrizione generale di un macchinario ad elevate produzioni e successivamente si analizza in dettaglio il sistema di trasferimento delle bottiglie, ossia la sezione dove sono presenti le maggiori criticità.

Nel capitolo successivo viene descritto in dettaglio il fenomeno dello sloshing, illustrando le equazioni che ne governano le dinamiche e fornendo un modello numerico discreto CFD in grado di rappresentare la natura del caso in esame.

Successivamente nel terzo capitolo il modello viene validato con una campagna di test dedicata.

Durante tale campagna vengono inoltre raccolte informazioni che risultano di fondamentale importanza per la rappresentazione virtuale (attuale e futura) della fenomenologia indagata.

Nel quarto capitolo si sfrutta il modello precedentemente validato per condurre un'analisi statistica/parametrica che coinvolge alcuni fattori fondamentali del fenomeno.

Il quinto capitolo conclude lo studio illustrando le considerazioni ed i risultati e raggiunti.

PAROLE CHIAVE: riempimento industriale, sloshing, studio CFD.

ABSTRACT

The aim of this thesis is to study sloshing problems inside the filling process of industrial machines.

With “sloshing” is identified a large range of phenomena that take into account the dynamic of fluid’s free surface.

In the first part of the thesis there is a general description of an industrial machine with high production velocity. A special importance is given to bottles transfer that is more critical part.

In the next section there is a general description of the fluid dynamics equations that represent sloshing phenomena. At the end of this chapter is presented the CFD numerical model.

The third chapter shows validation tests of the numeric model.

In fourth chapter CFD model (validated in the chapter before) is used for a statistical and parametric research that takes into account fundamental parameters of the phenomenon.

In last chapter conclusions and results are shown

KEY WORDS: industrial filling, sloshing, CFD study.

1

INTRODUZIONE

La continua richiesta in crescita di prodotti imbottigliati, dalla normale acqua minerale alle più variate bevande addizionate di anidride carbonica (CSD, Carbonated Soft Drink), fa sì che il mercato dei macchinari industriali, volti a soddisfare questa richiesta, sia in continuo sviluppo cercando quotidianamente di migliorare le proprie prestazioni

Da questa ricerca di miglioramento continuo nascono nuovi macchinari sempre più veloci ed efficaci. L'aumentare fino al limite le prestazioni porta con sé l'insorgere di nuove problematiche, fino ad ora di importanza non primaria.

Lo studio svolto in questa tesi è rivolto all'indagine delle problematiche di "sloshing" all'interno del processo di riempimento industriale.

Con il termine "sloshing" si identifica un'ampia gamma di fenomeni dove è implicata la dinamica del pelo libero in un fluido.

In letteratura tali problematiche sono da tempo affrontate per quanto riguarda settori quali automotive (movimento liquido nelle autocisterne), aeronautica (oscillazione carburante nei serbatoi), nautica (interazione tra onde e scafo) ecc. Solo di recente questo genere di fenomeni viene affrontato anche in ambiti più prettamente industriali.

In particolare, nelle macchine riempitrici, la dinamica del pelo libero del fluido, contenuto all'interno delle bottiglie, assume grande importanza in quanto deve essere limitata il più possibile la fuoriuscita di prodotto dal contenitore durante il processo di riempimento.

Tutto lo studio è stato svolto presso Sidel SpA, azienda leader mondiale nella fornitura di soluzioni per il confezionamento di liquidi in PET.

La storia di Sidel è strettamente intrecciata alla storia dell'industria alimentare ed è segnata dalle innovazioni che hanno migliorato la sicurezza alimentare e favorito il progresso della performance industriale.

Nel 2003, Sidel ha unito le proprie forze a quelle di Tetra Laval, leader mondiale nel confezionamento di liquidi alimentari, entrando a far parte del Gruppo Tetra Laval.

Nell'ottobre 2005, Sidel si è fusa con Simonazzi, un'impresa italiana specializzata in macchine di riempimento con sede in Italia, nell'area di Parma.

Oggi, Sidel ha assunto dimensioni mondiali e si è trasformata in un fornitore di linee complete, capace di gestire i progetti di impianti di imbottigliamento dalla A alla Z: dal design delle bottiglie, alla progettazione tecnica delle linee e la produzione delle macchine, fino all'installazione [1].

I fenomeni di sloshing non sono strettamente connessi ad un macchinario specifico, ma ogni processo di riempimento può presentare parametri di funzionamento tali da indurre questo genere di criticità.

Per poter comprendere al meglio dove essi si manifestino, viene fornita a seguire una descrizione completa di una macchina riempitrice SIDEL.

1.1 EUROTRONICA FM-C

Eurotronica FM-C è una macchina riempitrice a contropressione impiegata per la produzione di prodotti gasati CSD (Carbonated Soft Drink) in bottiglie di PET. La produttività ha un massimo di 72000 bph (bottles per hour) per bottiglie con formato da 0,5 litri e 40000 bph per formati da 2 litri.



Figura 1 EUROTRONICA FM-C

Nella figura sottostante vengono rappresentate le macrofasi eseguite.

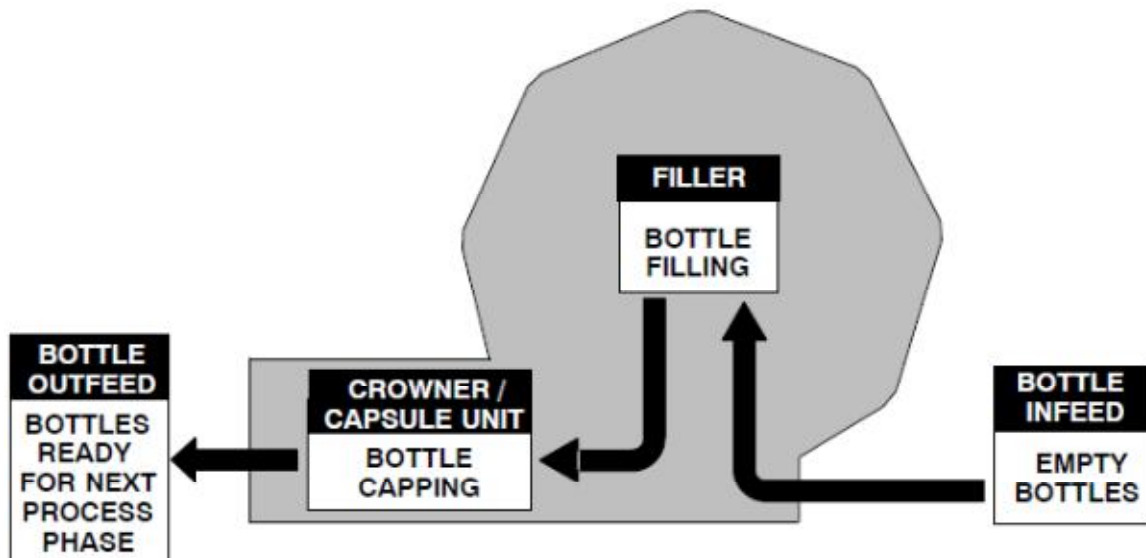


Figura 2 Macrofasi

All'interno della macchina possono quindi essere identificate 4 macrofasi:

- approvvigionamento bottiglie vuote (empty bottle infeed);
- riempimento (filling);
- tappatura (capping);
- uscita bottiglie piene e tappate (full and capped bottle outfeed)

L'approvvigionamento delle bottiglie vuote varia a seconda che la macchina sia in versione "classica" o "COMBI".

Nella versione classica le bottiglie in uscita dalla macchina soffiatrice (blower) sono trasferite, tramite un nastro trasportatore ad aria compressa, all'unità sciacquatrice che esegue le operazioni di sanificazioni necessarie prima del riempimento. Una volta sanificate, le bottiglie vengono portate alla riempitrice tramite stelle di trasferimento.

Nella versione COMBI le bottiglie, in uscita dalla soffiatrice, vengono direttamente trasportate, sempre tramite stelle di trasferimento, alla riempitrice. In questa versione non è necessario il passaggio attraverso un'unità sciacquatrice in quanto la bottiglia, durante tutto il suo tragitto, si muove sempre in ambiente controllato e sanificato (non sono presenti nastri ad aria).

Tuttavia il macchinario in questa configurazione presenta un numero di stelle di trasferimento tra blower e filler compreso da 3 a 7. Questo accorgimento è dovuto dalla necessità di raffreddare le bottiglie ancora in temperatura all'uscita del processo di soffiaggio. Durante il percorso viene infatti spruzzata acqua sugli involucri in plastica. Se ciò non avvenisse, le bottiglie si presenterebbero alla riempitrice ancora in temperatura. La successiva messa in pressione le deformerebbe irrimediabilmente.



Figura 3 COMBI

Di seguito si riporta uno schema degli elementi principali della macchina.

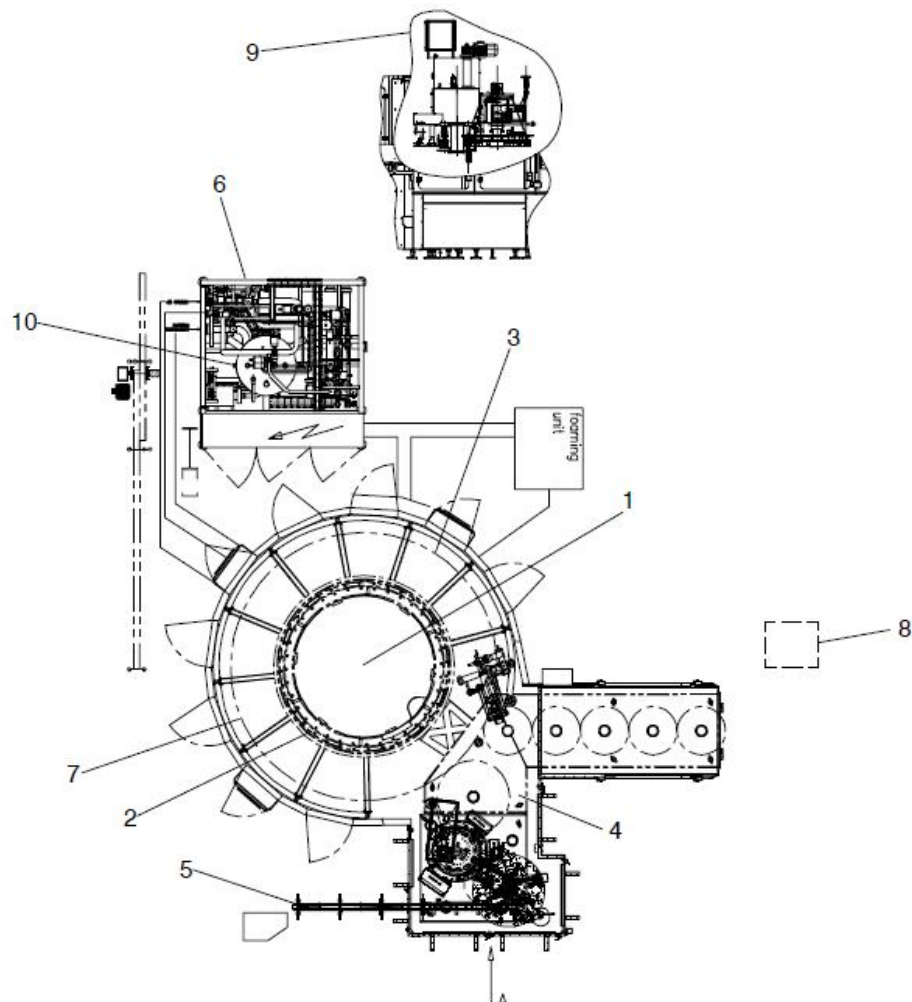


Figura 4 Schema Macchina

1. *Colonna centrale di alimentazione*
2. *Giostra riempitrice*
3. *Collettore anulare*
4. *Basamento*
5. *Sistema di handling delle Bottiglie*
6. *Unità esterna filler*
7. *Valvola di riempimento*
8. *Interfaccia operatore*
9. *Unità capsulatrice*
10. *Serbatoio statico*

La giostra riempitrice (o carosello) è il luogo in cui avviene il riempimento. Essa è composta da 2 parti:

- Parte fissa: supporto e connessione al basamento;
- Parte rotante: ancoraggio delle valvole e colonna alimentazione prodotto.

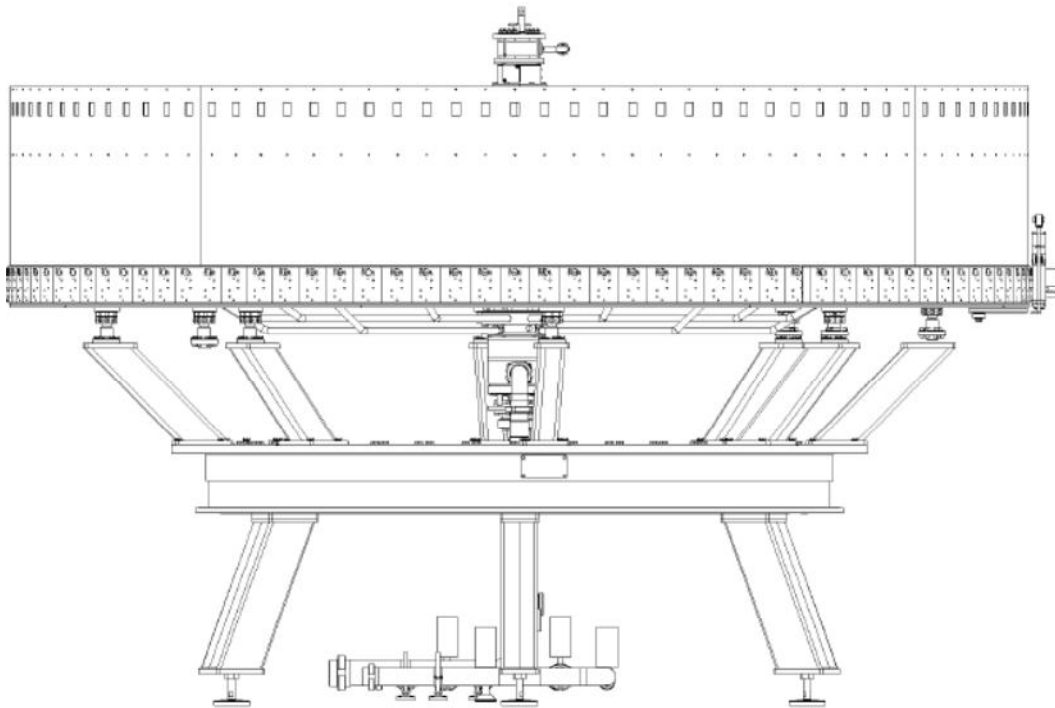


Figura 5 Carosello Riempitrice

La colonna rotante di alimentazione è di tipo anulare e convoglia le linee di alimentazione del prodotto e le linee di sterilizzazione dalla colonna centrale. La colonna centrale è costituita da 2 collettori, superiore ed inferiore. Lo scopo è quello di collegare la parte rotante del carosello con gli elementi statici del sistema.

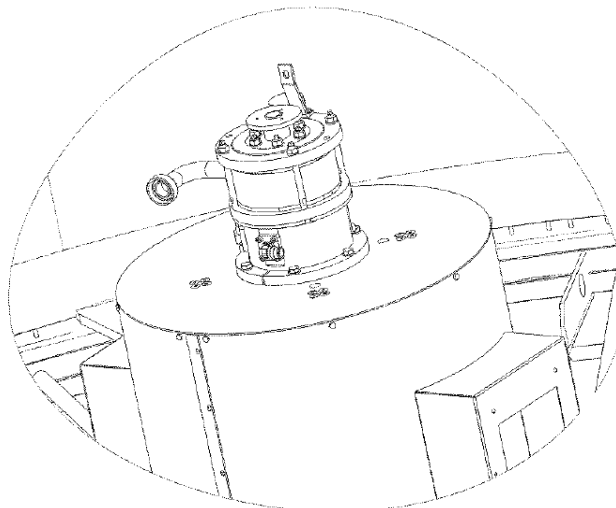


Figura 6 Collettore Superiore

Il collettore superiore fornisce alla giostra aria compressa, per la movimentazione delle valvole pneumatiche e unità di sollevamento. Fornisce inoltre i segnali elettrici per elettrovalvole e sonde.

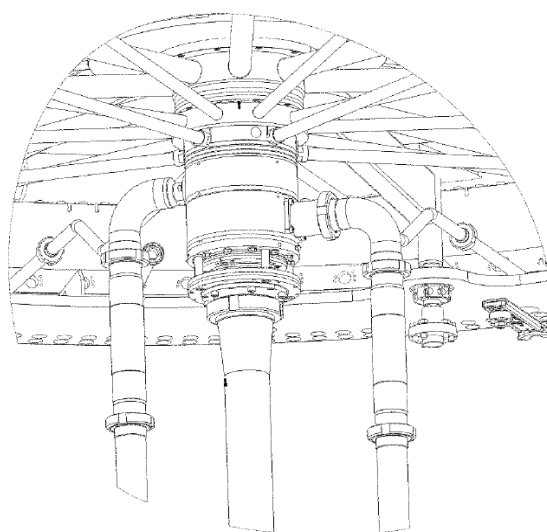


Figura 7 Collettore Inferiore

Il collettore inferiore provvede all'approvvigionamento di CO₂ e N₂, necessari, come illustreremo successivamente, alle fasi di riempimento.

Nella parte mobile della macchina sono installate le valvole di riempimento.

A seconda delle richieste del cliente esse vanno in numero da 48 a 192.

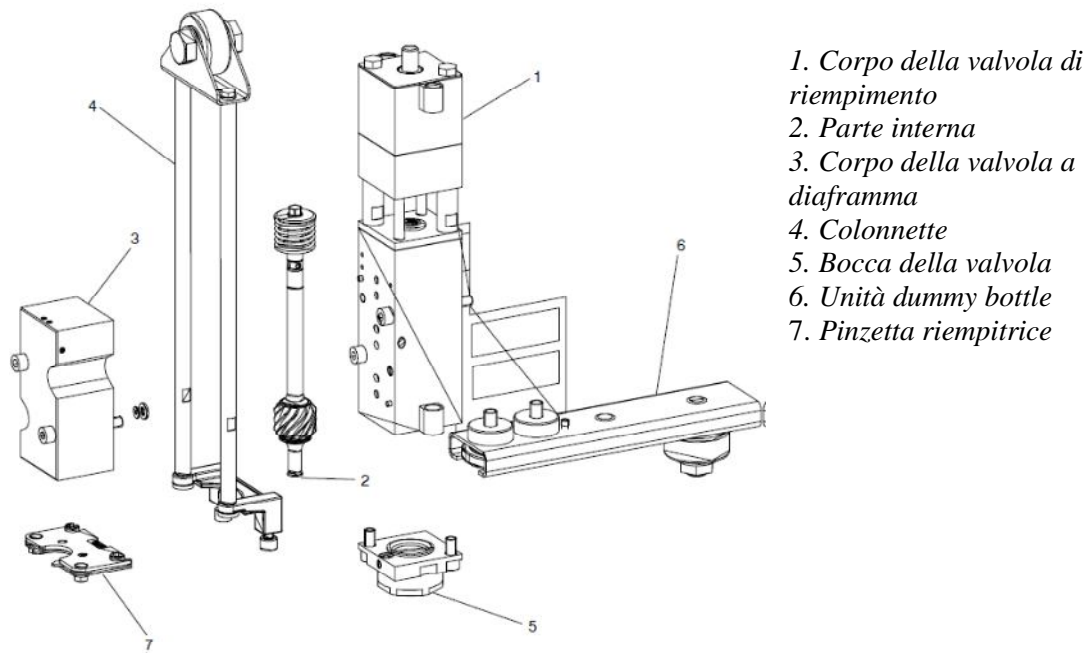


Figura 8 Valvola Riempimento

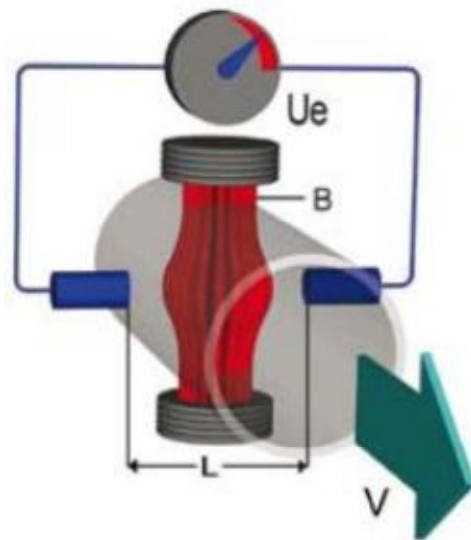
La determinazione della quantità di liquido nella bottiglia viene effettuata attraverso il controllo volumetrico con flussimetri magnetici. Tale metodo si rivela particolarmente adatto al riempimento di contenitori in PET in quanto, data l'instabilità dimensionale di quest'ultimi (deformazioni delle bottiglie sotto pressione), un tradizionale controllo a livello non garantirebbe la precisione richiesta.

Il funzionamento di questi misuratori fa capo alla legge dell'induzione di

Faraday:

“una tensione viene indotta in un conduttore che si muove attraverso un campo magnetico”.

Nel caso specifico il fluido rappresenta il conduttore in movimento e la tensione indotta, misurata da una coppia di elettrodi, è proporzionale alla velocità del fluido stesso. Il volume di fluido viene quindi ricavato nota la sezione del tubo di passaggio.



$$U_e = B \cdot L \cdot v$$

$$Q = v \cdot A$$

U_e = Voltaggio indotto

B = Induzione magnetica

L = Distanza tra gli elettrodi

V = Velocità di flusso

Q = Volume di flusso

A = Sezione del passaggio

Figura 9 Flussimetro Magnetico

I parametri di riempimento ed i segnali di controllo, necessari per il corretto funzionamento delle valvole, sono raccolti in una scheda elettronica “master” alloggiata nel PC di controllo. Questo comunica alle singole schede “slave” di gestione valvola tramite punti di trasmissione a raggi infrarossi.

Il sistema permette il monitoraggio continuo di ogni singola valvola, con la possibilità di modificare i parametri di funzionamento in modo automatico.

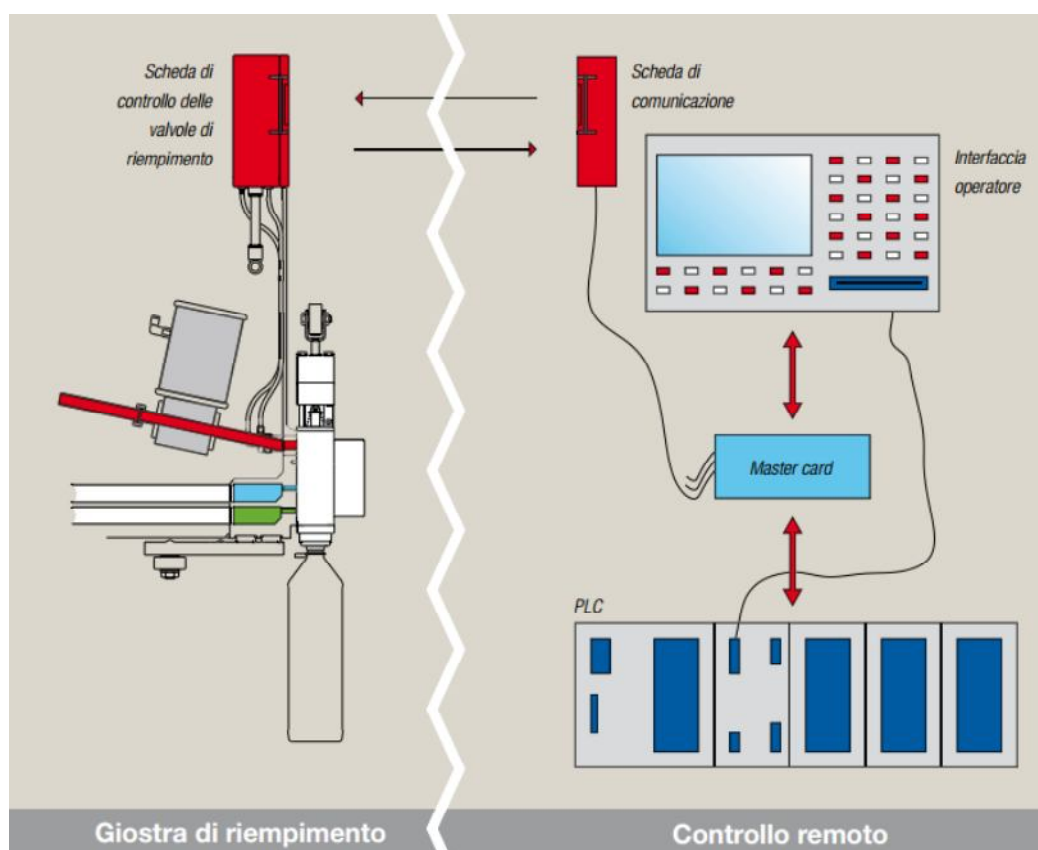


Figura 10 Controllo Valvole

Il riempimento vero e proprio della bottiglia sul carosello avviene in varie fasi:

Prima fase: posizionamento.

La bottiglia viene agganciata dalla pinza della riempitrice e successivamente sollevata tramite un cilindro pneumatico. A questo punto il bordo superiore del collo si trova in battuta con la guarnizione in gomma sul fondo della valvola di riempimento.

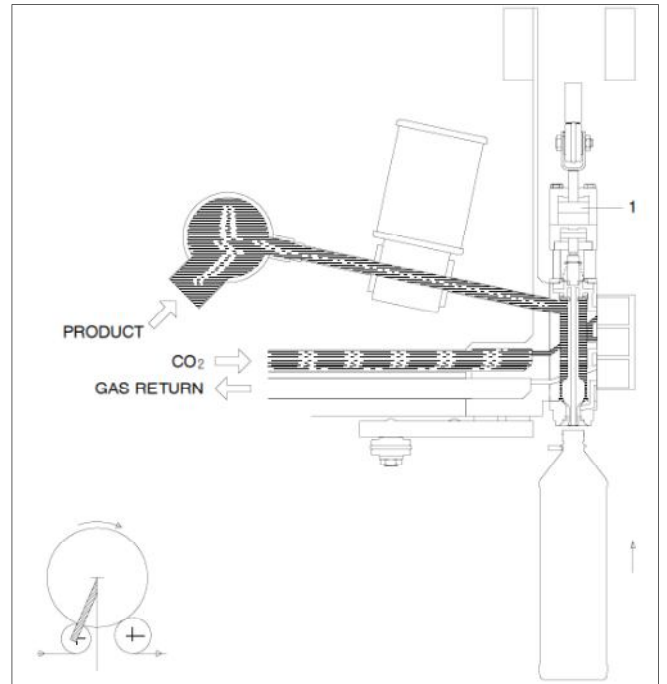


Figura 11 Fase1

Seconda fase: flushing.

Viene introdotta CO₂ nella bottiglia e di conseguenza espulsa l'aria precedentemente contenuta

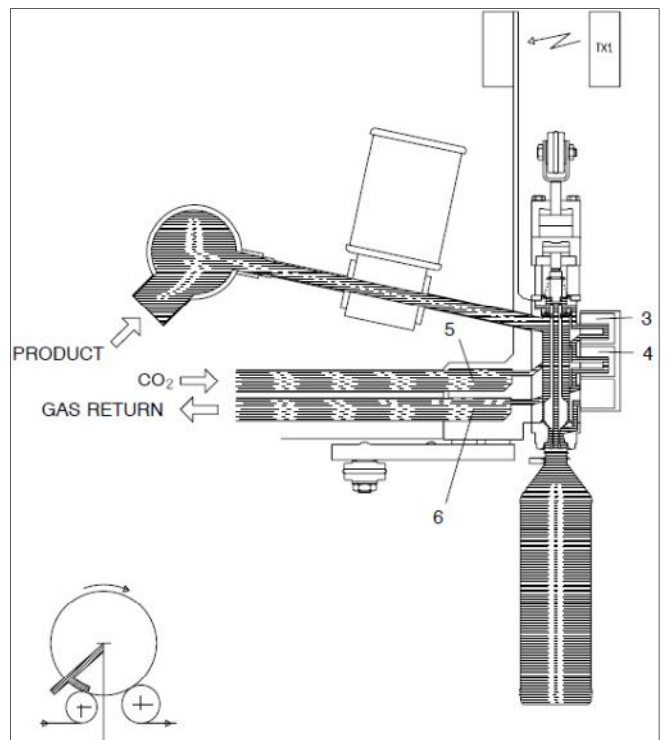


Figura 12 Fase2

Terza fase: pressurizzazione.

Una volta espulsa completamente l'aria, la CO₂ all'interno della bottiglia viene messa in pressione in modo da garantire un riempimento isobarometrico con il serbatoio del prodotto.

Infatti, per ridurre quanto più possibile fenomeni di schiumatura, le pressioni di lavoro sono normalmente 1.5/2 bar più alte rispetto alla pressione di saturazione del prodotto stesso. Se, per esempio, si riempie CocaCola o Pepsi alla temperatura di 18°C con CO₂ pari a 8,5g/l la pressione di lavoro sarà circa 5 bar.

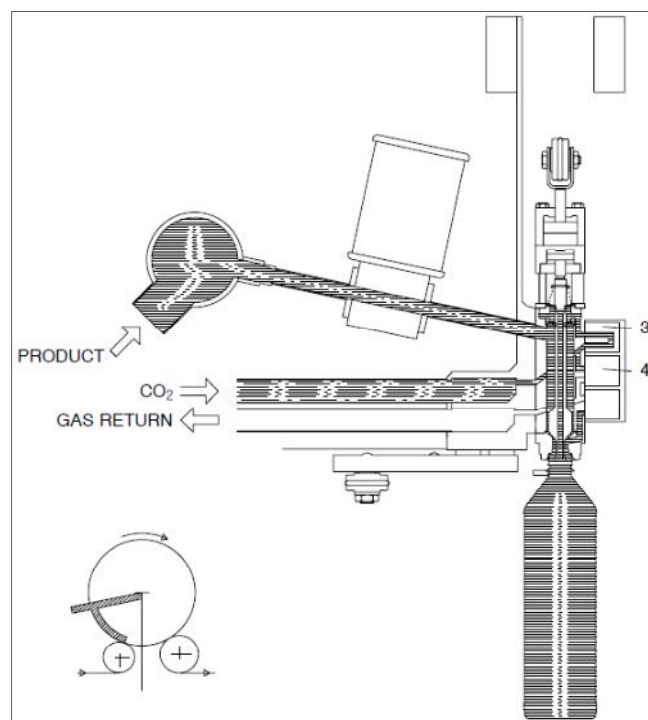


Figura 13 Fase3

Quarta fase: filling.

Completata la pressurizzazione, il passaggio del prodotto viene aperto. Esso scende nella bottiglia per gravità. Mentre il prodotto entra la CO₂ esce da uno scarico.

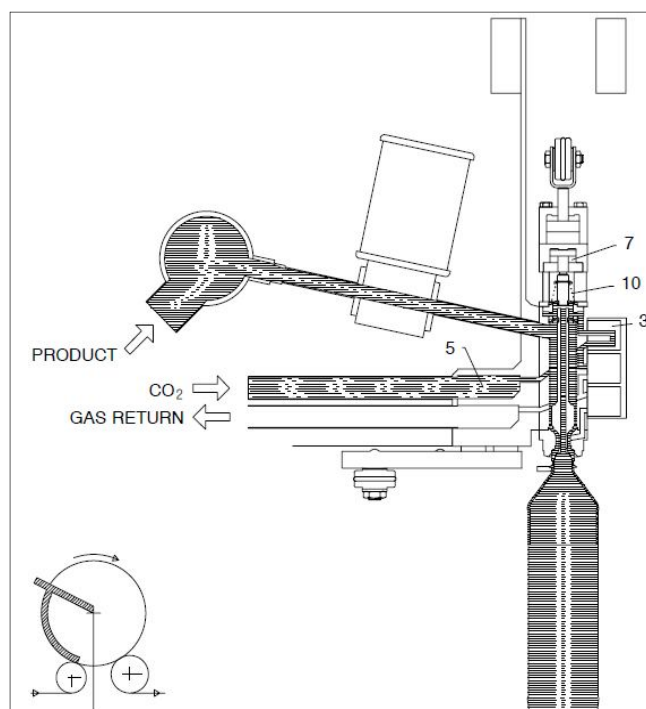


Figura 14 Fase4

Questa fase termina quando il misuratore di flusso registra il volume desiderato: viene inviato alla valvola un segnale che aziona la chiusura del passaggio.

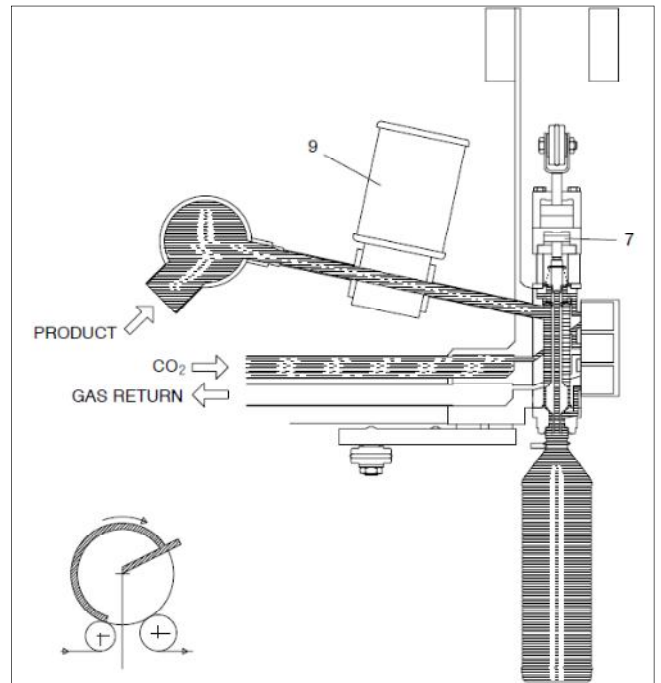


Figura 15 Fase4 finale

Si noti dalla figura 4 che il prodotto in pressione è contenuto in un serbatoio statico posizionato all'esterno della macchina. Nello stesso alloggiamento esterno ("skid") sono presenti: gruppi valvole, pannello pneumatico, ingrassatore e componenti di controllo per il risciacquo.

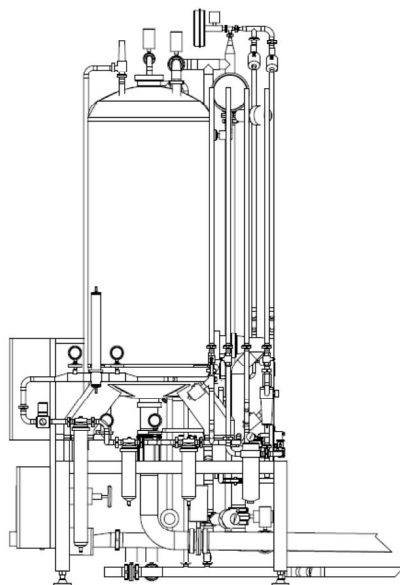


Figura 16 Serbatoio

Quinta fase: decompressione.

La bottiglia viene messa in comunicazione con la camera di scarico che si trova a pressione ambiente.

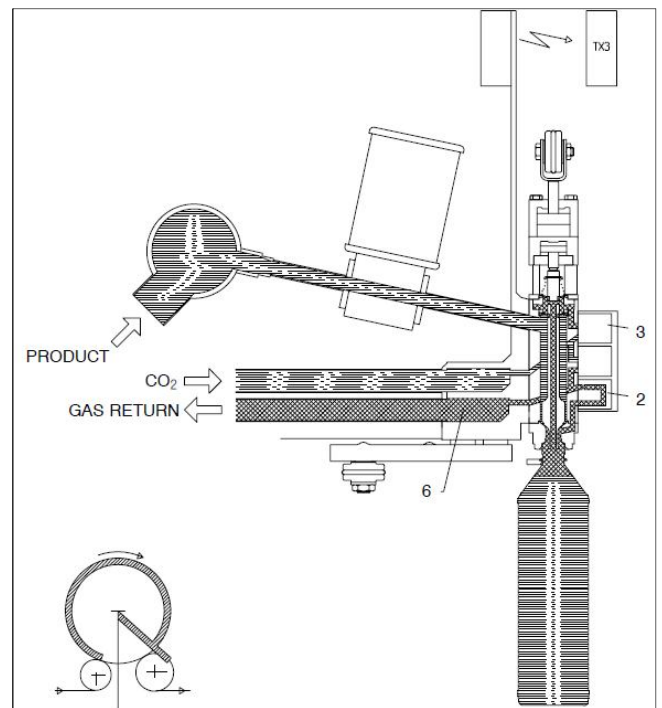


Figura 17 Fase5

Sesta fase: discesa.

La bottiglia viene fatta scendere e ritorna a trovarsi all'altezza corretta per garantire lo scambio con la stella d'uscita.

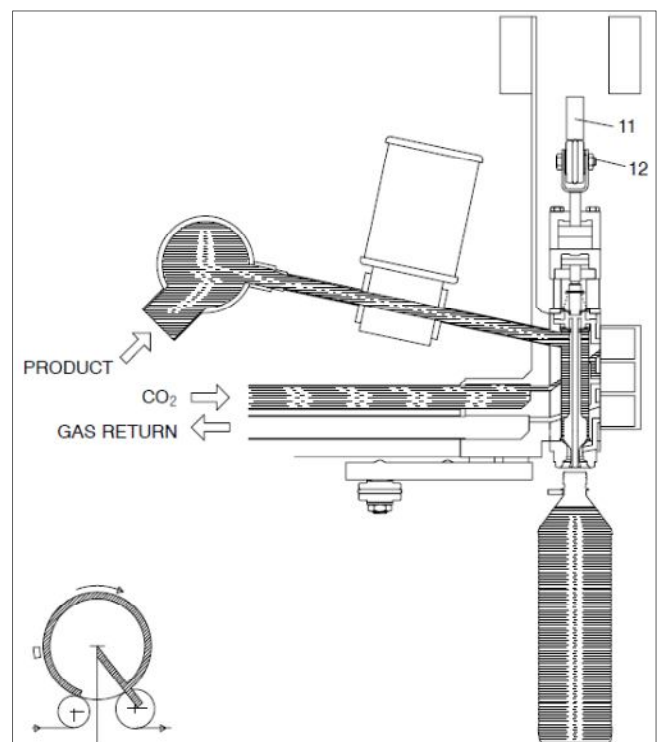


Figura 18 Fase6

Quando la valvola non è occupata in operazioni di riempimento, l'unità "falsa bottiglia" (dummy bottle) viene ad essa accostata. Ciò mette in comunicazione canali di ingresso e camere di scarico, permettendo operazioni di lavaggio e sanificazione.

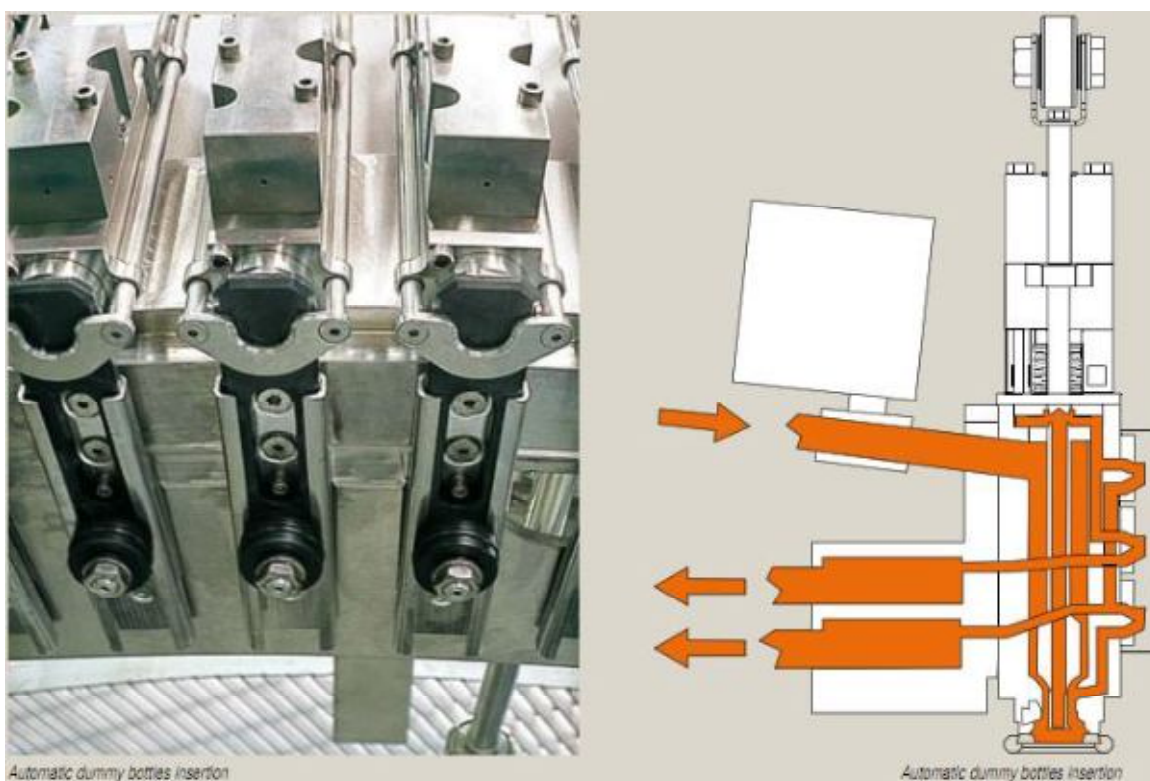


Figura 19 Lavaggio

In uscita dal carosello di riempimento le bottiglie vengono portate all'unità capsulatrice.

Essa è costituita da una serie di teste tappanti disposte su un carosello. E' presente un dispositivo "pick and place" (stella distribuzione capsule) che distribuisce i tappi in presenza delle bottiglie.

Le testine tappanti eseguono 2 movimenti:

- ruota su se stessa a velocità variabile;
- trasla assialmente sotto il comando di una camma.

Tale combinazione del moto permette di prelevare il tappo pre-filettato di plastica dal sistema di distribuzione, posizionarsi sulla bottiglia, avvitarlo ed infine stringerlo prima che la bottiglia sia rilasciata.



Figura 20 Tappatore

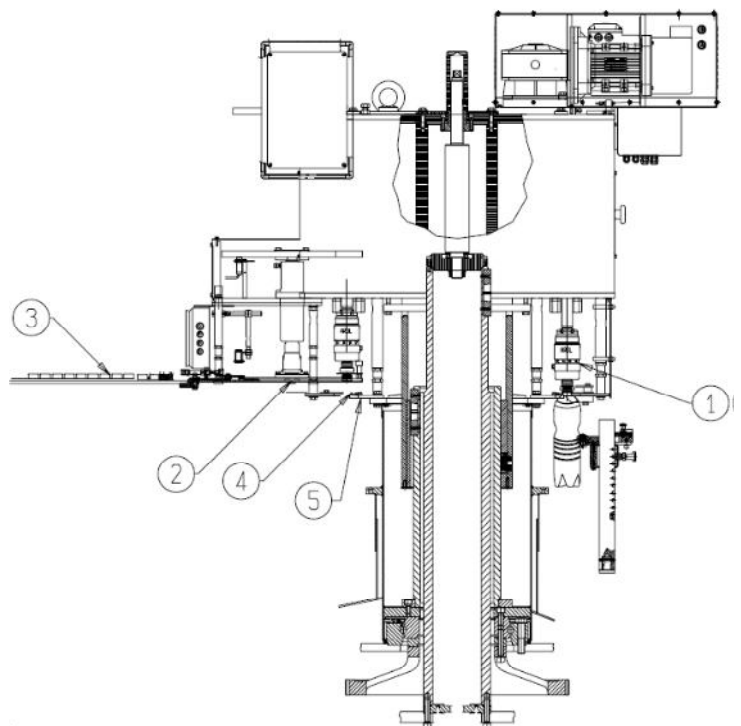


Figura 21 Tappatore dettaglio

Tutte le parti della macchina precedentemente citate (stelle di trasferimento, carosello, tappatrice ecc) sono installate su un basamento.

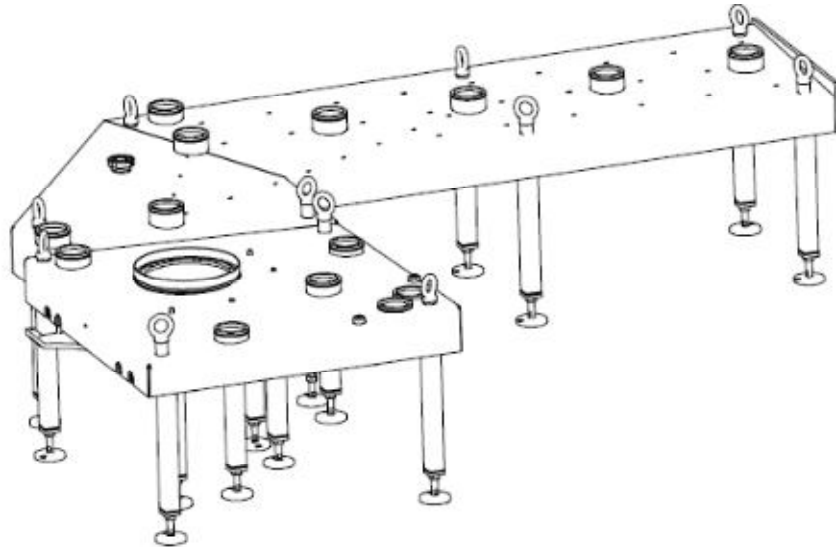


Figura 22 Basamento

Esso può essere nella versione “Ultra Clean”, ossia con un piano superiore a doppia inclinazione.

Questo accorgimento consente un rapido drenaggio di ogni residuo del prodotto ed acqua.

Per quanto riguarda la movimentazione meccanica dell'intera macchina esistono 2 possibilità:

la prima soluzione classica tradizionale prevede un motore elettrico asincrono con un inverter che ne controlla la velocità. Il motore movimenta l'albero veloce del riduttore della riempitrice attraverso un sistema cinghia/puleggia. Un pignone, che ingrana su una ruota a dentatura interna, trasmette il moto alla giostra riempitrice.

Il riduttore della giostra è collegato attraverso un doppio giunto cardanico ad un altro riduttore che a sua volta movimenta un treno di ruote dentate in cascata che mettono in rotazione tutte le stelle montate sul basamento.

L'intero sistema di trasmissione del moto si trova al di sotto del basamento.

La seconda alternativa di movimentazione prevede l'utilizzo di più motori brushless il cui sincronismo alle diverse velocità è garantito per intero in via elettronica [2] [3].

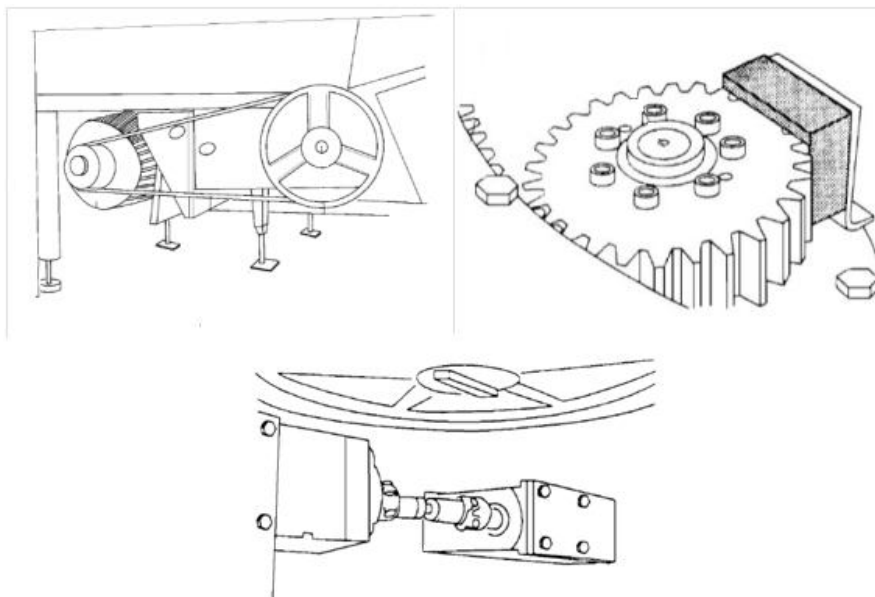


Figura 23 Movimentazione dettagli

1.2 TRASFERIMENTO BOTTIGLIE

Si analizza ora, con un livello di dettaglio maggiore, i componenti che permettono la movimentazione delle bottiglie all'interno della macchina. Tale approfondimento viene effettuato in quanto, durante una parte di tale moto, si hanno i maggiori problemi collegati ai fenomeni di sloshing.



Figura 24 Handling bottiglie

La movimentazione delle bottiglie, come già accennato in precedenza, è possibile grazie all'impiego di stelle rotanti sulla cui periferia sono montate delle pinze di trasferimento. Durante questa fase la bottiglia è afferrata in corrispondenza del collo.

Il passaggio tra due stelle successive è garantito dal perfetto sincronismo delle fasi di apertura e chiusura delle pinze stesse.

Nella figura a seguire si può vedere il percorso che idealmente percorre la bottiglia all'interno della macchina: delle stelle di trasferimento conducono le bottiglie vuote alla riempitrice, la quale poi le cede ad una stella d'uscita che a sua volta le trasporta alla capsulatrice. Quest'ultima le cede ad un'ulteriore stella che convoglia il tutto su un nastro di uscita.

Si noti che si parla di percorso "ideale" delle bottiglie. Di fatto la forza centrifuga agente su di esse tende ad inclinare il corpo. Tale inclinazione non deve superare un certo valore limite oltre il quale lo scambio tra le pinze non è più garantito.

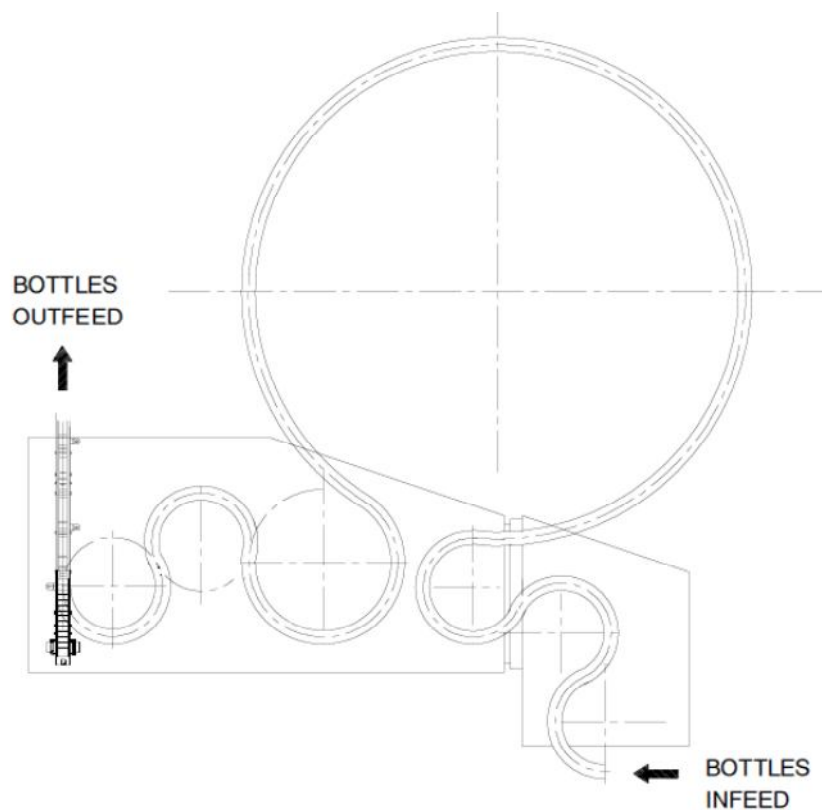


Figura 25 Percorso Bottiglie

Il diametro primitivo, ossia il diametro della circonferenza ideale sulla quale passa parte del tragitto delle bottiglie, è in questo caso 720mm per le stelle di trasferimento in ingresso alla riempitrice e 1080mm per la stella in uscita.

Il diametro della riempitrice può cambiare a seconda delle configurazioni e dal numero di valvole installate ma in generale può assumere un valore massimo di 6480mm.

La velocità angolare delle stelle (e quindi l'accelerazione centrifuga) è legata alla velocità di produzione ed al numero di pinze presenti sulle stelle stesse.

Definendo quindi la velocità di produzione ed il numero di valvole sulla riempitrice si vincolano di conseguenza tutte le velocità dei restanti organi rotanti.

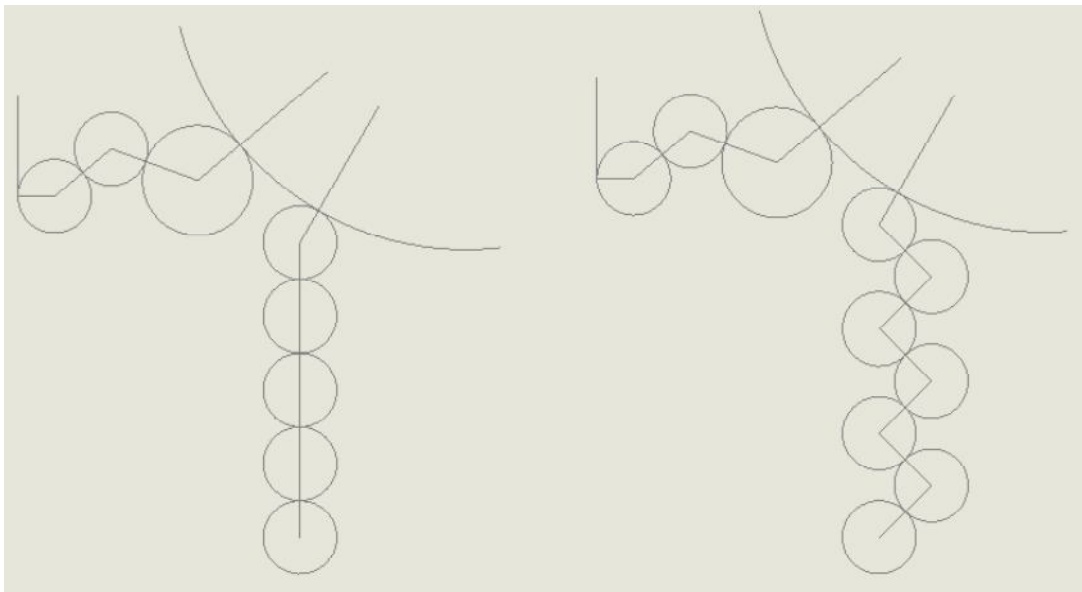


Figura 26 Configurazioni Stelle Trasferimento

Di fondamentale importanza, come già accennato, sono le pinze di trasferimento sulle stelle.

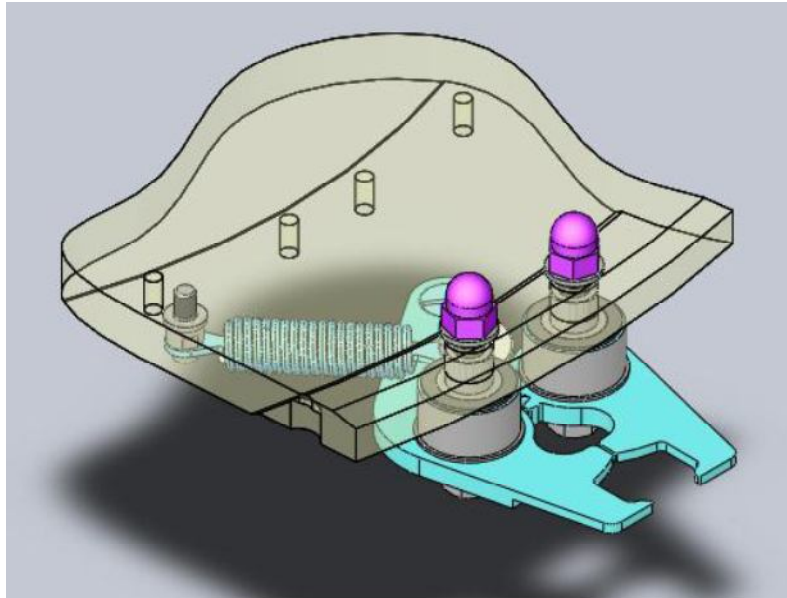


Figura 27 Pinza

Esse si possono suddividere in 2 macro categorie, a seconda della posizione del punto di ingaggio:

- soprabaga ;
- sottobaga.

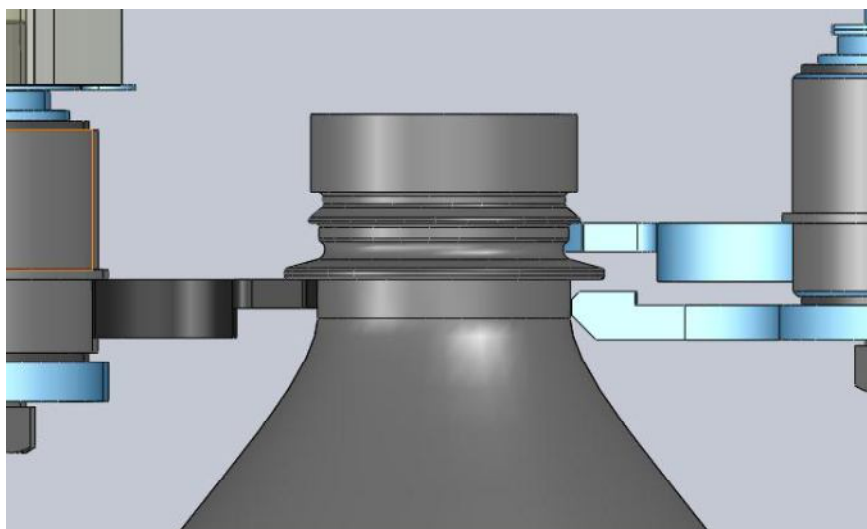


Figura 28 Pinze Soprabaga/Sottobaga

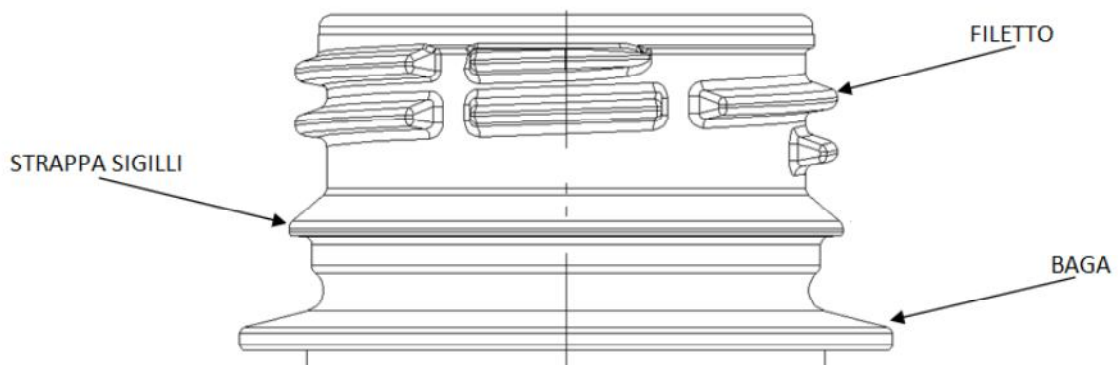


Figura 29 Dettaglio Baga

Come si può intuire, per motivi di interferenza, stelle consecutive devono montare tipi di pinza differenti.

La corretta apertura delle pinze è garantita da un rullo, collegato ad una chela, che ingaggia una camma statica presente sulla stella. La chiusura viene invece effettuata da una molla in trazione che agisce anche essa su una chela. Il sincronismo tra le 2 chele è effettuato mediante una coppia di ingranaggi.

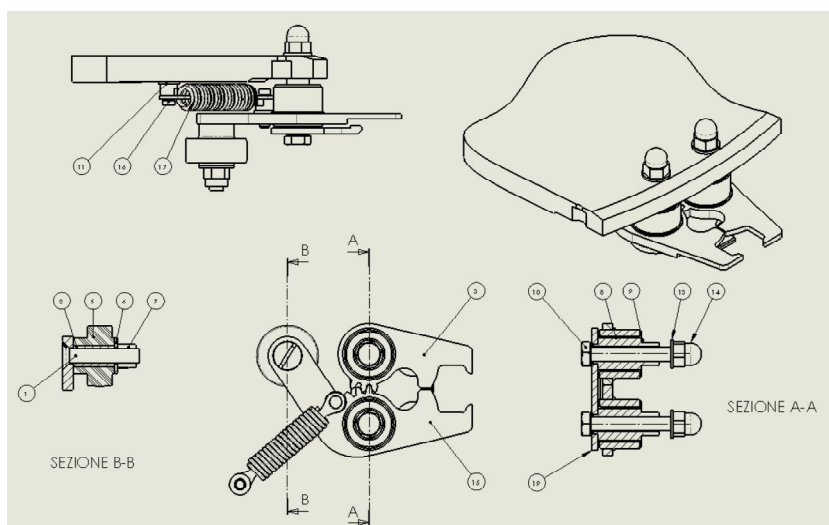


Figura 30 Spaccato Pinza

Lo scambio quindi delle bottiglie durante il percorso è frutto di un perfetto sincronismo tra velocità periferica delle stelle rotanti e fasi di apertura/chiusura delle pinze.

Nell'immagine sottostante abbiamo una vista dal basso di 2 stelle consecutive che si scambiano una bottiglia (per chiarezza è montata una sola pinza per stella).

Data la medesima dimensione delle 2 stelle la velocità angolare sarà la stessa.

La bottiglia passa dalla stella di destra a quella di sinistra.

La pinza che dovrà afferrare la bottiglia è aperta con sufficiente anticipo prima di raggiungere il punto di scambio, ossia il punto di tangenza delle due circonferenze primitive. Ciò è necessario per evitare fenomeni di interferenza tra chele e collo.

Durante l'avvicinamento inizierà l'inserimento del collo tra le chele della nuova pinza che, nei pressi del punto di scambio, comincerà a chiudersi.

La fase di chiusura termina quando le due pinze sono allineate; in contemporanea

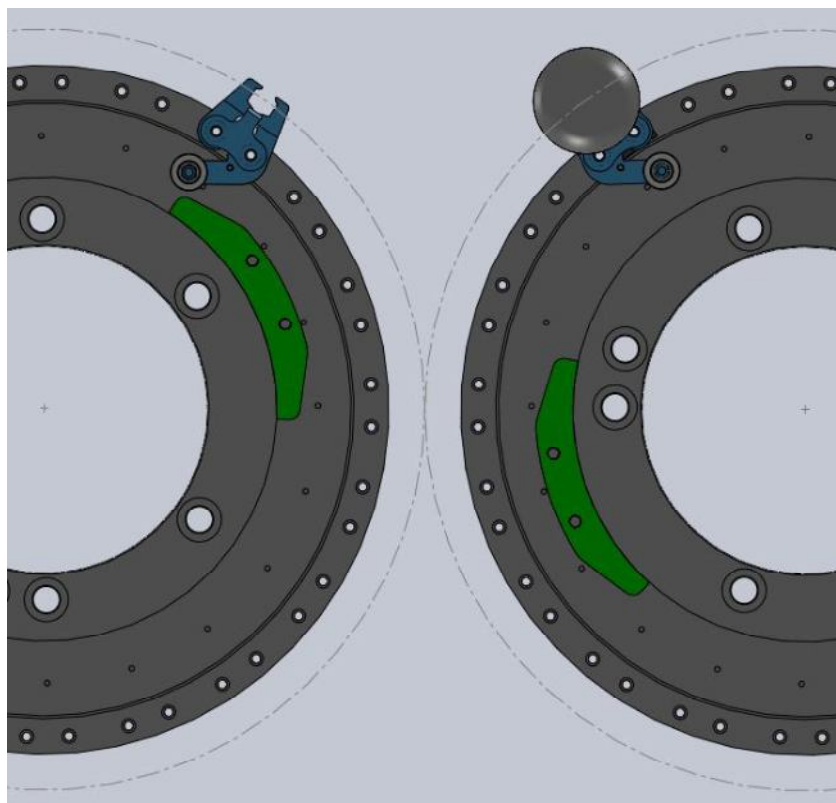


Figura 31 Scambio Bottiglia

inizia l'apertura dell'altra pinza che dovrà essere sufficientemente rapida da evitare interferenze.

Il sincronismo precedentemente descritto è guidato dalle camme fisse installate sulla parte statica delle stelle.

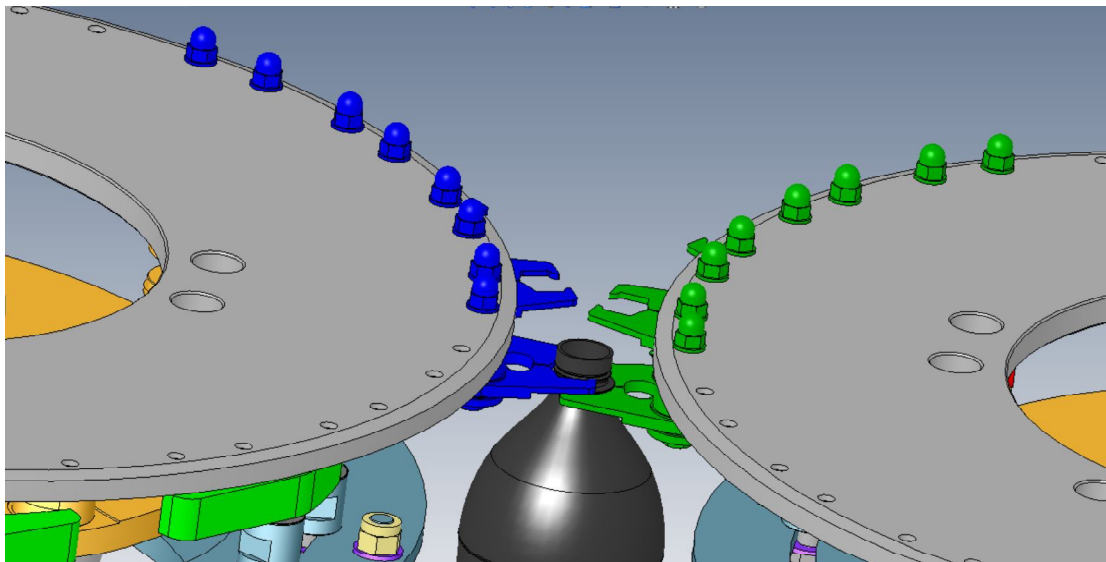


Figura 32 Scambio Bottiglia

2

SLOSHING

Analizzato in dettaglio il moto della bottiglia ed i componenti meccanici che lo eseguono, possiamo identificare e studiare separatamente la sezione interessata dai problemi legati allo sloshing.

La giostra riempitrice, completate tutte le fasi di riempimento, rilascia la bottiglia piena di prodotto e senza nessuna capsula che ne assicura il contenimento.

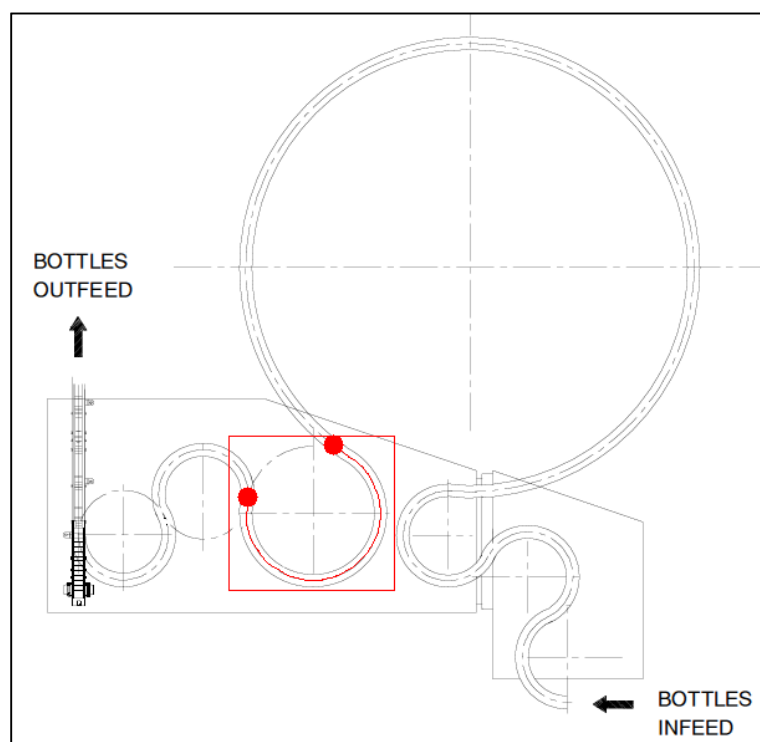


Figura 33 Scambi

Tutte le forze che agiscono sulla bottiglia tra il carosello riempitore e l'unità capsulatrice inducono quindi un movimento del pelo libero che, per alcune combinazioni di certi parametri, provocano una fuoriuscita del prodotto stesso. Lo studio, che da qui in avanti verrà svolto, identificherà ed analizzerà questi parametri in modo da agevolare la limitazione ai problemi legati a questo fenomeno.

Innanzitutto vediamo che nel tragitto identificato avvengono 2 scambi:

- giostra riempitrice/ stella uscita;
- stella uscita/ capsulatore.

Con una semplice composizione vettoriale possiamo notare che allo scambio, data la rotazione contraria che devono avere 2 componenti mobili in successione per garantire medesima direzione e verso della velocità tangenziale, le bottiglie si trovano sottoposte ad un cambiamento di verso, pressoché istantaneo, della forza centrifuga agente su di esse.

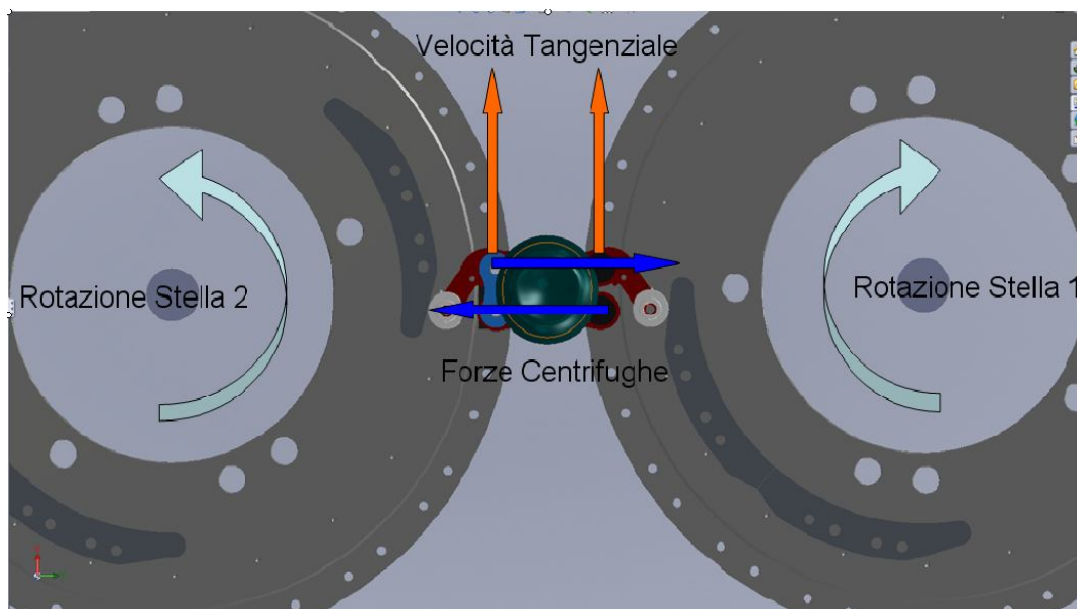


Figura 34 Forza Centrifuga

Sulla stella d'uscita, che con la bottiglia a carico compie una rotazione di circa 270° , viene verificato, attraverso studio CFD, che tale rotazione è sufficiente per far assumere al pelo libero una posizione fissa e stabile: il fenomeno si può quindi considerare arrivato a regime.

Nelle immagine sottostanti si può vedere il pelo libero in successione a 0° , 95° , 190° e 270° .

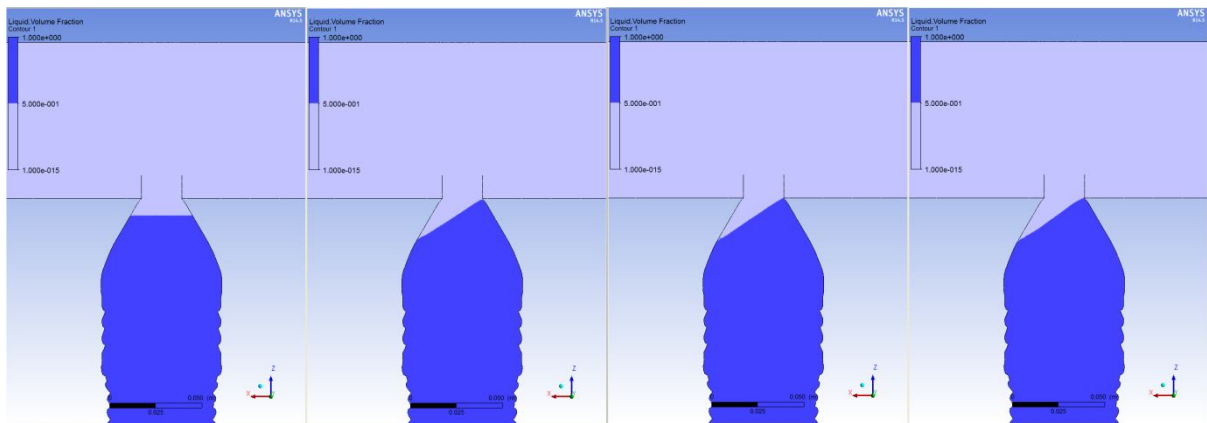


Figura 35 Inclinazione Pelo libero

2.1 EQUAZIONI FLUIDODINAMICHE

Questo capitolo fornisce una breve descrizione teorica generale delle equazioni che governano la fluidodinamica ed in particolare le tecniche usate per modellare l'interazione tra due fluidi.

2.1.1 DINAMICA DEL FLUIDO

La dinamica dei fluidi viene descritta dalle equazioni di Navier Stokes [4] [5]. Quest'ultime sono una coppia di equazioni vettoriali differenziali non lineari. La prima equazione descrive la conservazione della massa

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (2.1)$$

Dove :

ρ = densità;

$\mathbf{v} = (v_x, v_y, v_z)$ vettore velocità;

x, y, z = coordinate spaziali.

La conservazione della massa fornisce 1 equazione con però 4 incognite. Essa può essere risolta singolarmente solo se è nota la densità e il problema è monodimensionale.

Diversamente, per chiudere il sistema, si necessita di altre 3 equazioni. Esse ci sono date dall'introduzione dell'equazione sulla conservazione della quantità di moto (che altro non è che la riscrittura applicata ai fluidi della seconda legge di moto di Newton)

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{v} + \mathbf{f} \quad (2.2)$$

Dove:

p = pressione;

μ = viscosità;

$\mathbf{f} = (f_x, f_y, f_z)$ vettore delle forze esterne.

Se ci si trova in una condizione tale per cui il fluido può essere considerato incompressibile ed inviscido le equazioni di Navier Stokes si semplificano in:

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (2.3)$$

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \mathbf{f} \quad (2.4)$$

Tale coppia sono le equazioni di Eulero.

Inserendo l'identità vettoriale $(\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} = \frac{1}{2} \nabla |\mathbf{v}|^2 + (\nabla \times \mathbf{v}) \times \mathbf{v}$ (2.5)

ed assumendo che le forze esterne siano legate ad un gradiente di forza tale per cui $\mathbf{f} = -\nabla V$ (2.6)

la seconda equazione di Eulero assume la forma:

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \frac{1}{2} \nabla |\mathbf{v}|^2 + (\nabla \times \mathbf{v}) \times \mathbf{v} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \mathbf{f} \quad (2.7)$$

Inserendo ora la grandezza vorticità, definita come $\boldsymbol{\omega} = \nabla \times \mathbf{v}$ (2.8)

ed effettuando le dovute semplificazioni l'equazione si può riscrivere come:

$$\frac{\partial \boldsymbol{\omega}}{\partial t} + \nabla \times (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{v}) = 0 \quad (2.9)$$

Notiamo che le equazioni 2.9 e 2.3 descrivono il campo di moto del fluido. Se la vorticità è nulla ad un certo istante di tempo essa non potrà mai assumere valori differenti.

Un fluido con vorticità nulla è detto irrotazionale. Se non è presente rotazionalità il campo di velocità può essere descritto come il gradiente di un potenziale

$$\mathbf{v} = \nabla\phi \quad (2.10)$$

Inserendo quest'ultima equazione nella 2.3 si ottiene

$$\nabla^2\phi = 0 \quad (2.11)$$

Che è l'equazione di Laplace.

Ritornando alla 2.7 ,per un caso stazionario e raccogliendo come a seguito

$$(\nabla \times \mathbf{v}) \times \mathbf{v} = -\nabla \left(\frac{p}{\rho} + \frac{|\mathbf{v}|^2}{2} + V \right) \quad (2.12)$$

Possiamo scrivere la seguente relazione

$$\frac{p}{\rho} + \frac{|\mathbf{v}|^2}{2} + V = \mathbf{Cost} \quad (2.12)$$

Che altro non è che il teorema di Bernoulli.

Lungo la linea di flusso la quantità $\frac{p}{\rho} + \frac{|\mathbf{v}|^2}{2} + V$

rimane costante nel tempo.

Affinché le equazioni 2.3 e 2.4 possano essere risolte devono essere imposte delle condizioni al contorno.

Esse saranno di tipo temporale (campo di moto iniziale)

$$\mathbf{v}(\mathbf{0}, \mathbf{x}) = \mathbf{v}_0 \quad (2.13)$$

E spaziale, come l'imposizione di velocità ortogonale nulla sulle superfici:

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{v} = \mathbf{0} \quad (2.14)$$

2.1.2 FLUIDO DINAMICA COMPUTAZIONALE

La fluido dinamica computazionale (CFD) è una branca della fluido dinamica che sfrutta tecniche di discretizzazione matematica per risolvere le equazioni di Navier Stokes. Tali tecniche sono di fatto necessarie in quanto le equazioni non sono risolvibili analiticamente, se non per casi estremamente semplici.

Fondamentale per la CFD è la discretizzazione del dominio continuo del fluido: il volume viene diviso in tante celle (griglia di calcolo o mesh) che rendono applicabili algoritmi adeguati per la risoluzione delle equazioni di N.S. discrete . La dimensione degli elementi elementari deve essere paragonabile con la dimensione caratteristica del fenomeno (funzione del numero di Reynolds) poiché il risultato sia quanto più simile alla realtà.

Con l'ausilio di calcolatori si possono quindi risolvere le milioni di operazioni generate dagli algoritmi.

La risoluzione diretta (DNS, Direct Numerical Simulation) delle equazioni di N.S. è possibile sia per flussi laminari che turbolenti. Per quest'ultimi sorge però un problema: dato l'elevato Reynolds, la scala di grandezza delle celle per cogliere correttamente il fenomeno deve essere estremamente piccola. Ciò comporta un numero necessario di elementi talmente elevato che anche al giorno d'oggi non vi sono processori sufficientemente potenti in grado di supportare una tale mole di calcoli da svolgere.

E' quindi necessario l'ausilio di modelli di turbolenza, quali il LES (Large Eddy Simulation) e RANS (Reynolds Averaged Navier Stokes). Il primo segue una teoria secondo la quale solo i grandi vortici di un fenomeno sono caratteristici. I piccoli sono comuni e uguali per tutti. Vengono quindi risolte le equazioni solo

per la prima scala del fenomeno. Il secondo metodo, note le caratteristiche del fluido, media le equazioni di N.S. nel tempo [6] [7].

Queste tecniche, inizialmente nate e utilizzate in ambito prettamente aeronautico, trovano oggi, grazie alla migliorata flessibilità dei codici, grande impiego in moltissimi settori: dall'industria meccanica (a secondo delle equazioni implementate si risolvono problemi di scambi termici, combustioni, irradiazione, turbomacchine ecc.) al campo biomedico (opportunamente implementando i codici si simula il comportamento di fluidi particolari, quale ad esempio il sangue umano) [8].

Nello specifico per lo sviluppo di questa tesi è stato utilizzato il software commerciale ANSYS CFX.

Ansys CFX è un software ad alte prestazioni in grado di risolvere un'ampia gamma di problemi che coinvolgono ogni tipo di fenomeno legato alla fluidodinamica.

La caratteristica principale di questo software è il riuscire ad abbinare tecnologie di risoluzione avanzate ad una notevole robustezza e velocità di calcolo. La grande varietà di solutori disponibili permette di poter cogliere virtualmente una vasta gamma di fenomeni fisici implicati nei problemi fluidodinamici.

Il software fornisce un'interfaccia moderna, intuitiva e flessibile con un'ampia possibilità di personalizzazione delle simulazioni grazie anche alle capacità di interagire direttamente con il solutore tramite codici scritti direttamente dall'utente.

Inoltre il software fornisce una serie di tools in grado di integrare ed interagire con i principali programmi di CAD. Sono sviluppati internamente avanzati codici per la creazione delle griglie di calcolo in grado di poter affrontare anche le più complesse geometrie.

Infine è rapido ed intuitivo interagire con i risultati dei solutori grazie alla sezione dedicata alla visualizzazione ed elaborazione dei dati post processo di simulazione [9].

2.1.3 MODELIZZAZIONE PELO LIBERO

Quando si parla di “pelo libero” si intende l’interfaccia tra 2 fluidi dove la differenza di densità è molto elevata (ad esempio gas ed acqua).

Conseguenza di ciò l’inerzia del gas viene trascurata. Il gas agisce solo come condizione di pressione dell’interfaccia.

Esistono vari modi di modellare il fenomeno.

Il più semplice è l’utilizzo di “funzioni d’altezza” (Height functions): definito un riferimento globale nella mesh l’altezza del pelo libero sarà funzione del tempo, della distanza da tale riferimento e ovviamente dal campo di moto.

Tale metodo è inapplicabile se ad una posizione corrispondono più valori del pelo libero (ad esempio casi con bolle o onde) e dove l’inclinazione supera il rapporto tra le dimensioni della singola cella (dy/dx).

L’evoluzione dell’interfaccia è governata dall’equazione cinematica:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \mathbf{u} \frac{\partial h}{\partial \mathbf{x}} = \mathbf{v} \quad (2.15)$$

Dove

u, v = componenti x,y della velocità

Tale metodo, dove applicabile, risulta comunque affidabile e veloce. È inoltre applicabile a casi tridimensionale senza aggiunta di particolari difficoltà.

Un secondo metodo è l'utilizzo di "segmenti linea" (Line Segments): esso può essere visto come una generalizzazione delle funzioni d'altezza. L'interfaccia viene suddivisa in tanti segmenti elementari ed è concesso che ad un valore di posizione X siano presenti più soluzioni.

Tale metodo incontra grossi limiti quando i segmenti, causa movimento del fluido, finiscono per intersecarsi.

Inoltre risulta molto difficile una sua applicabilità in 3 dimensioni.

Terzo metodo è l'uso di "Particelle Marker" (Marker Particles): tutto il volume di liquido viene rappresentato con particelle. Tali particelle sono soggette a tutte le equazioni fisiche/cinematiche del caso in questione. Il pelo libero è presente dove le particelle sono in contatto con regioni non occupate dalle particelle stesse.

Tale metodo, nonostante dia ottimi risultati, è difficilmente applicabile in quanto richiede una grande capacità computazionale.

Attualmente il metodo più utilizzato nei codici CFD è il VOF (Volume Of Fluid).

Tale metodo determina la forma e la posizione del pelo libero sul concetto di volume di fluido frazionario: una variabile aggiuntiva assume valore 1 se la cella è completamente piena di liquido, 0 se è vuota (quindi con gas).

Tutte le celle con valore compreso tra 0 e 1 corrispondono ad elementi di superficie.

In generale l'evoluzione della superficie viene poi calcolata con algoritmi specifici che risolvono l'equazione:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla F = 0 \quad (2.16)$$

Dove

F = volume fraction

Il VOF fornisce ottimi risultati e non necessita di grandi sforzi computazionali in quanto richiede solo il calcolo e l'archiviazione di 1 variabile scalare aggiuntiva.

Delineata l'interfaccia del pelo libero i campi di moto dei fluidi possono essere calcolati separatamente applicando le equazioni di NS e le opportune condizioni al contorno [10] [11].

2.2 MODELLO CFD

Si analizza ora la creazione dell'intero modello CFD.

In prima istanza viene valutata la possibilità di semplificare ed alleggerire le analisi appoggiandosi a modelli bidimensionali.

In virtù della simmetria nella geometria (e qualche analisi preliminare che confermasse le ipotesi) questa possibilità viene confermata ed il fenomeno osservato numericamente passa da 3 dimensioni a 2.

La ragione principale di questa scelta risiede nel tempo di calcolo impiegato per ogni simulazione, a pari validità di risultati ottenuti.

Infatti se un modello completo 3D (milioni di elementi) richiede un tempo di calcolo (su un computer di buone prestazioni) pari a circa 30 ore, il modello 2D (migliaia di elementi) richiede all'incirca 1/5 del tempo.

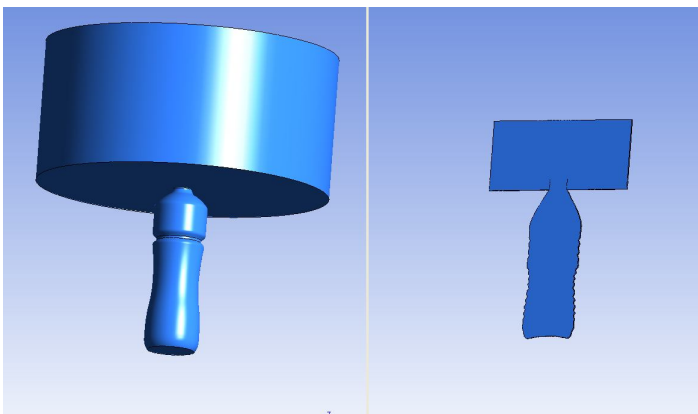
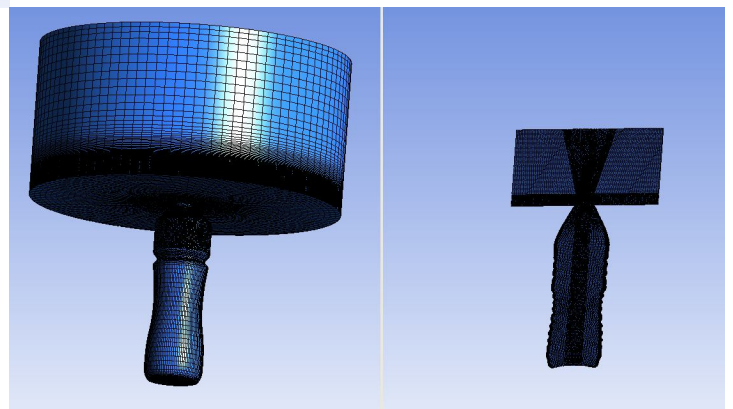


Figura 36 Confronto 3D/2D

Figura 37 Confronto Mesh 3D/2D



2.2.1 MODELLO 2D

I modelli bidimensionali vengono creati utilizzando un solo strato di elementi esadecimali.

La dimensione massima degli elementi non supera i 2 millimetri.

In prossimità delle pareti viene effettuato un infittimento con legge quadratica, in modo da poter cogliere al meglio gli effetti derivanti dallo strato limite.

Al di sopra della bottiglia viene creato un volume che rappresenta l'atmosfera circostante.

In prossimità del restringimento nel collo e al di fuori di esso viene effettuato un infittimento della griglia: in queste zone si presume si avrà il maggior movimento del pelo libero nonché il distacco di gocce dalla massa principale del fluido interno.

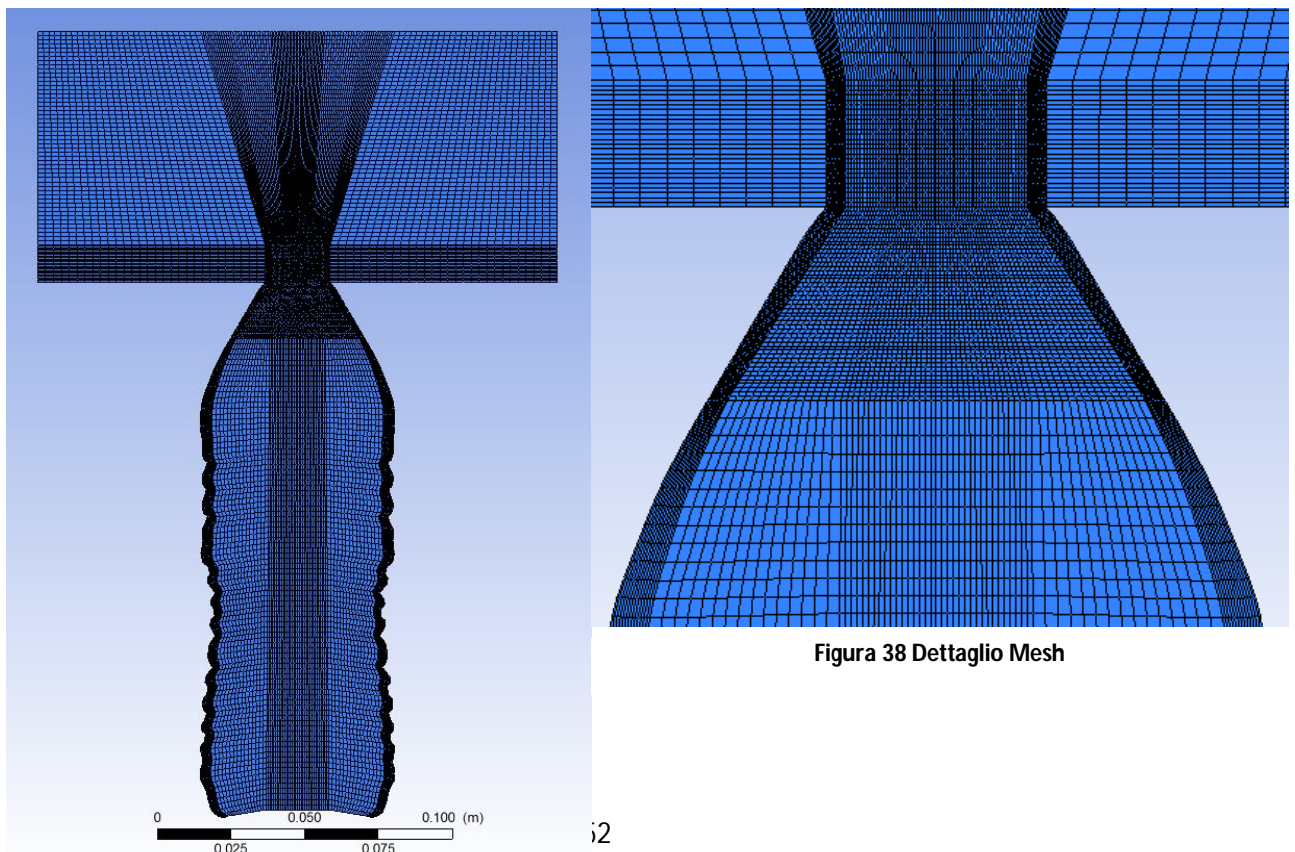


Figura 38 Dettaglio Mesh

La mesh descritta viene importata nel simulatore fluidodinamico CFX e da qui è possibile impostare la simulazione CFD.

Alle superfici laterali della parte superiore (rappresentanti l'atmosfera) viene imposta una condizione di "opening", ossia un libero ingresso ed uscita di fluido, con pressione pari ad 1 atm.

Tutte le rimanenti superfici laterali hanno condizione di "wall" (parete, velocità nulla sulla superficie).

Le superficie anteriori e posteriori hanno proprietà di simmetria, il che equivale ad una profondità infinita.

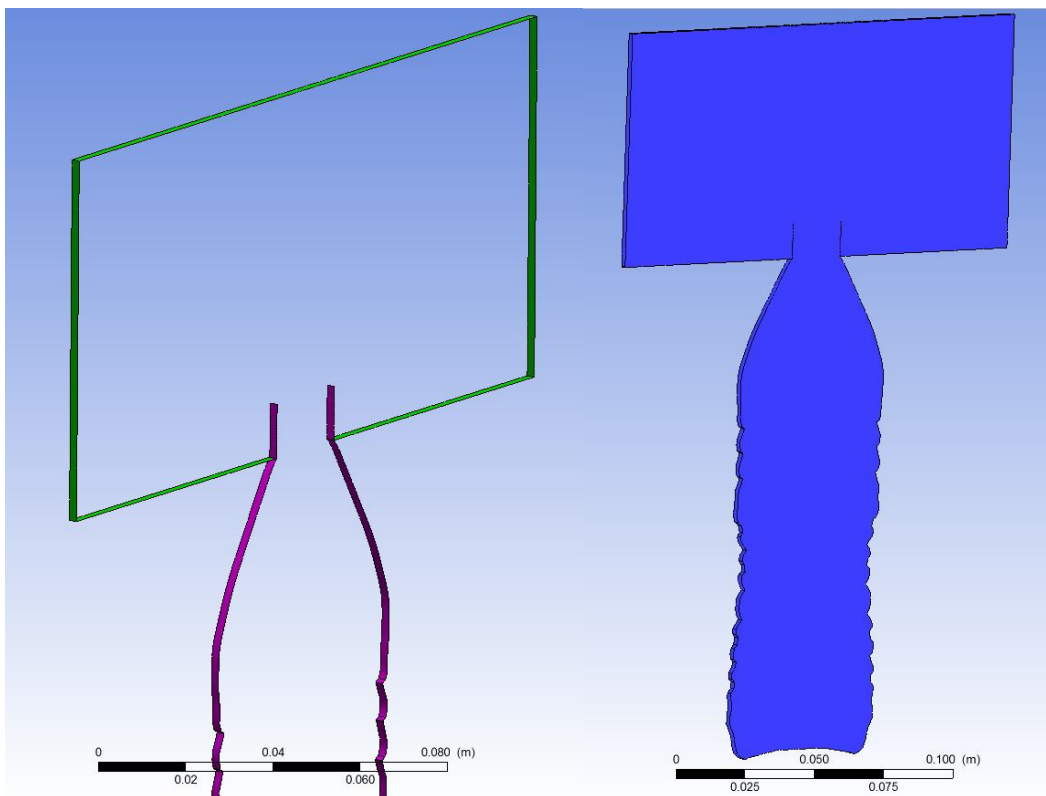


Figura 39 Impostazioni CFD

Il dominio della simulazione è bifase. Sono presenti 2 fluidi: aria ed acqua. Il primo, come già accennato, occupa la sezione superiore della bottiglia e parte del collo, mentre il secondo è presente da un certo livello in poi, a seconda del livello di riempimento (fill level) del caso in esame.

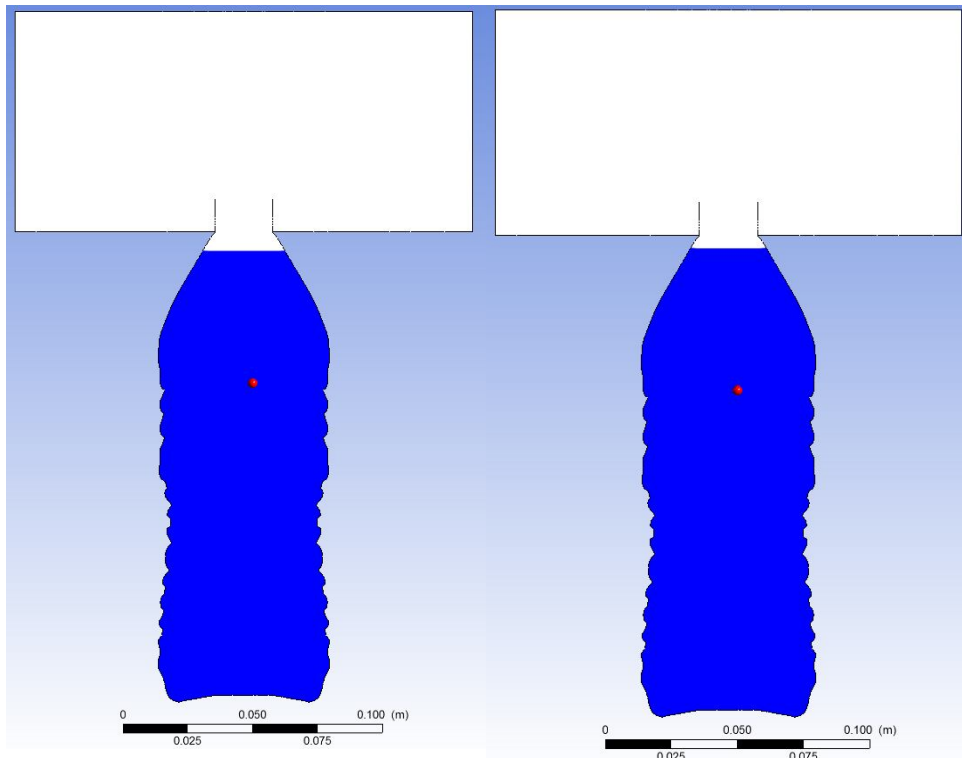


Figura 40 Confronto Fill Level

Le forze centrifughe vengono simulate applicando a tutto il dominio una velocità di rotazione attorno ad un asse.

La velocità di rotazione deriverà direttamente dalla dimensione della stella così come la distanza dall'asse, pari a metà del diametro primitivo preso in esame.

Lo scambio bottiglia viene simulato nel seguente modo: quando il tempo trascorso è pari a quello di una rotazione di 270° sulla prima stella, la simulazione viene fermata e vengono cambiate le impostazioni relative alla velocità ed asse di rotazione.

A questo punto il caso continua fino a che non viene raggiunto il tempo pari sempre ad una rotazione di 270° sulla seconda stella.

Così facendo, le forze centrifughe, avranno un andamento qualitativo pari a quanto riportato nel grafico sottostante.

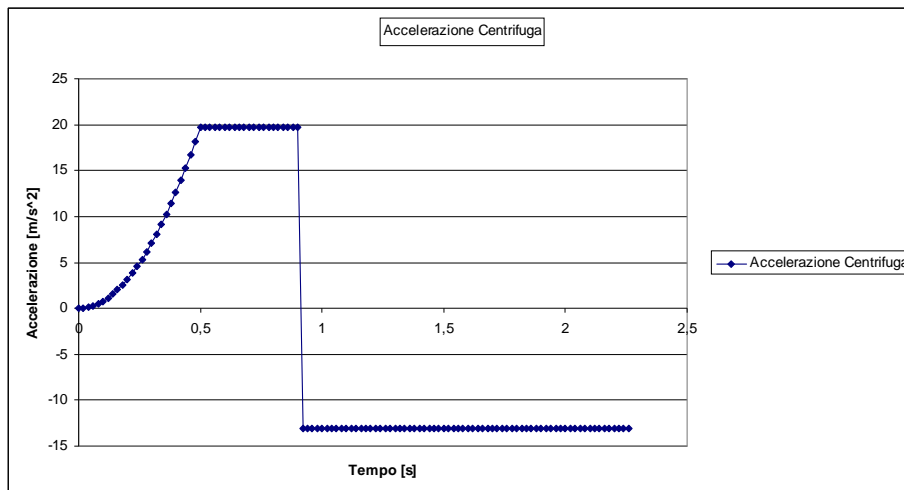


Figura 41 Andamento Forza Centrifuga

Si noti come inizialmente venga imposta un'ascesa graduale per agevolare la convergenza della simulazione.

3

VALIDAZIONE MODELLO CFD

Affinché si possano ritenere attendibili le considerazioni ed i risultati ottenuti mediante simulazioni CFD, è necessario validare il modello numerico attraverso una serie di test che riproducano il fenomeno.

A tal fine vengono studiate ed analizzate le modalità possibili con cui indagare il fenomeno e le tipologie di sensori di possibile impiego.

Da letteratura esistono diversi metodi con cui valutare la posizione del pelo libero.

A seguito una breve descrizione dei metodi e la valutazione del possibile utilizzo per il nostro scopo.

SENSORI DI PRESSIONE: inserendo dei sensori di pressione è possibile identificare la pressione al di sotto del pelo libero e quindi della superficie stessa. Questo metodo fornisce risultati attendibili nel caso non vi siano grosse oscillazioni del liquido. Inoltre, vista la particolare geometria dove questi sensori andrebbero inseriti (interno di una bottiglia formato 0,5L), la presenza del sensore stesso altererebbe consistevolmente il fenomeno da misurare.

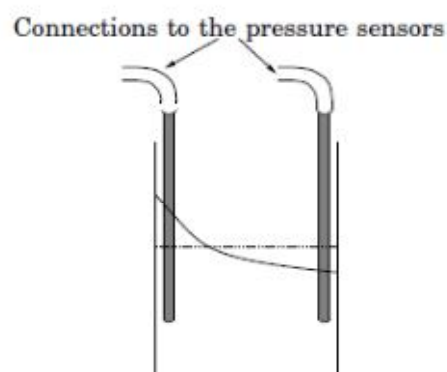


Figura 42 Sensori di Pressione

SENSORI AD ULTRASUONI: buona precisione ma anche in questo caso il liquido deve essere notevolmente statico rispetto a quanto richiesto dalle condizioni di prova.

SENSORE CAPACITIVO: questa tipologia di sensori è usualmente utilizzata per la rilevazione del livello di liquido all'interno dei contenitori. Si sfrutta la differenza di permeabilità tra aria e acqua all'interno delle due armature di un condensatore. Quando il liquido oscilla con una certa velocità, per effetto della tensione superficiale e capillarità, la quantità all'interno delle armature si muove con velocità decisamente inferiore rispetto all'esterno. Inoltre, come nel caso del sensore di pressione, la presenza del sensore stesso altera il fenomeno.

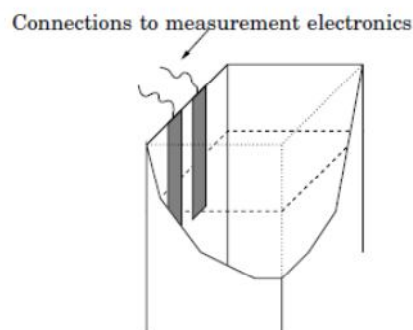


Figura 43 Sensore Capacitivo

MISURA A CONTATTI ELETTRICI: questo metodo sfrutta la conduttività elettrica dell'acqua. Una serie di circuiti aperti viene collocata lungo le pareti del contenitore. Il liquido muovendosi andrà a chiudere tali circuiti. Questo tipo di misurazione fornisce solo valori non continui ed inoltre la misura risulta spesso affetta da un errore provocato da gocce che chiudono accidentalmente i circuiti.

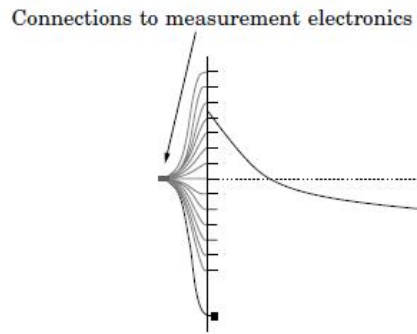


Figura 44 Misura a Contatti Elettrici

SENSORE LASER: questo genere di sensore, che sfrutta lo sfasamento tra le onde di un raggio emesso dal sensore stesso e riflesso dal pelo libero, fornisce una misura molto accurata e non affetta da errore al muoversi del liquido. In letteratura questo sensore ha fornito ottimi risultati ed è stato impiegato più volte in ambito sperimentale. Tuttavia (come verrà illustrato con più chiarezza successivamente), nel nostro caso non è stato possibile installare tale genere di misuratore in quanto:

- la particolare forma delle bottiglie rende difficile la misura del pelo libero da parte del sensore;
- la necessità di avere un sensore solidale con il movimento della bottiglia (su di un banco prova che illustreremo in seguito) ne complica notevolmente l'installazione e l'impiego stesso [12].

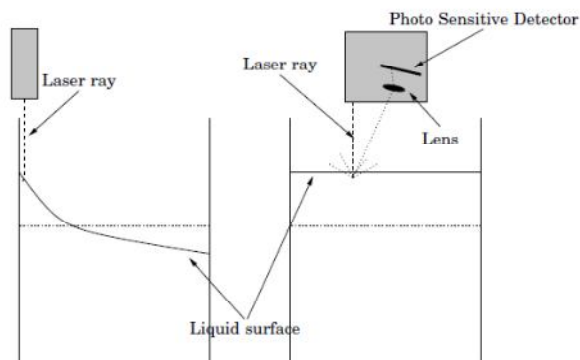


Figura 45 Sensore Laser

FOTOCAMERA AD ALTA VELOCITA': l'utilizzo di una fotocamera compatta ad alta velocità risulta quindi l'unica opzione percorribile per poter registrare e successivamente analizzare il fenomeno. Tutte le informazioni necessarie per identificare il fenomeno vengono colte da tale fotocamera (rate di acquisizione 120 fotogrammi al secondo) ed il problema dell'istallazione dell'acquisitore solidale con la bottiglia sul banco rotativo viene risolto.

3.1 VALIDAZIONE STATICA E DINAMICA

Affinché la validazione sia la più corretta e rigorosa possibile vengono condotte 2 campagne di test.

La prima serie è volta ad una validazione dove sono implicati fenomeni statici, mentre nella seconda vengono eccitati ed analizzati fenomeni dinamici.

Le campagne di test verranno descritte ed analizzate individualmente a seguire.

3.1.1 VALIDAZIONE STATICA

Con questo genere di prova si vuole verificare che il software ed il modello numerico rispondano correttamente sotto l'effetto di una forza con modulo, direzione e verso costanti e non dipendenti dal tempo.

Durante l'intera prova la bottiglia rimarrà fissata staticamente alle stesse pinze.

Per fare ciò ci si avvale di un banco prova rotativo:

tale banco riproduce un carosello riempitivo con diametro primitivo pari a 1440mm. Sul diametro esterno sono installate varie pinze per il serraggio della bottiglia, nonché valvole di riempimento che nell'intera durata del test vengono, per ovvi motivi, disattivate.

La movimentazione del banco è possibile grazie ad un motore elettrico che, attraverso una trasmissione ad ingranaggi, ingaggia il pignone centrale il quale movimenta tutta la macchina.

La regolazione della velocità è ottenuta mediante un sistema PLC che, tramite un potenziometro, regola la corrente nel motore.

La bottiglia viene quindi riempita con acqua (con aggiunta di colorante rosso) a vari livelli, fissata alla pinza e messa in rotazione. Il banco impiega solo qualche secondo per raggiungere la velocità di regime e viene lasciato in questa situazione per svariati giri.

In questo lasso di tempo la bottiglia, staticamente agganciata alle pinze, sarà soggetta alla sola forza centrifuga, data dalla formula

$$F = r * \Omega^2 \quad (3.1)$$

Dove

$r = \text{raggio [m]}$

$\Omega = \text{velocità di rotazione } \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}}\right]$



Figura 46 Banco Rotativo



Figura 47 Dettagli Banco Rotativo

Medesime condizioni vengono riprodotte con il simulatore CFD.

Tutto il dominio viene infatti sottoposto ad una forza centrifuga di valore costante e la simulazione si arresta quando il sistema arriva a regime.

Prima di passare al confronto tra test reale e simulazione CFD si vuole far notare un particolare, che al fine della validazione statica risulterà ininfluenza, ma come vedremo sarà di fondamentale importanza sia per la validazione di tipo dinamico sia per le successive considerazioni: tra la boga della bottiglia e la pinza (in questo caso sottobaga) è presente dello spazio che si traduce in un gioco tra i due componenti.

Questo gioco fa sì che la bottiglia possa subire inclinazioni rispetto all'asse verticale. Tale inclinazione, pari a $3^{\circ}/4^{\circ}$, ai fini statici non altera in maniera significativa l'inclinazione del pelo libero, ma ai fini dinamici rappresenterà un elemento di fondamentale importanza. Tuttavia tale inclinazione viene comunque introdotta nella simulazione statica.

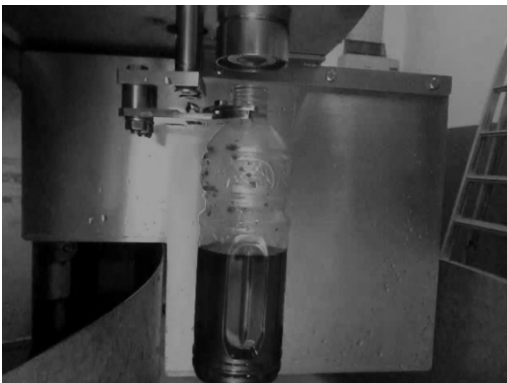


Figura 50 Inclinazione Bottiglia Ferma



Figura 48 Inclinazione Bottiglia in Rotazione



Figura 49 Confronto Inclinazioni

Si riportano a seguire le immagini di confronto tra il test e la simulazione CFD, dove viene messo in risalto l'angolo di inclinazione del pelo libero.

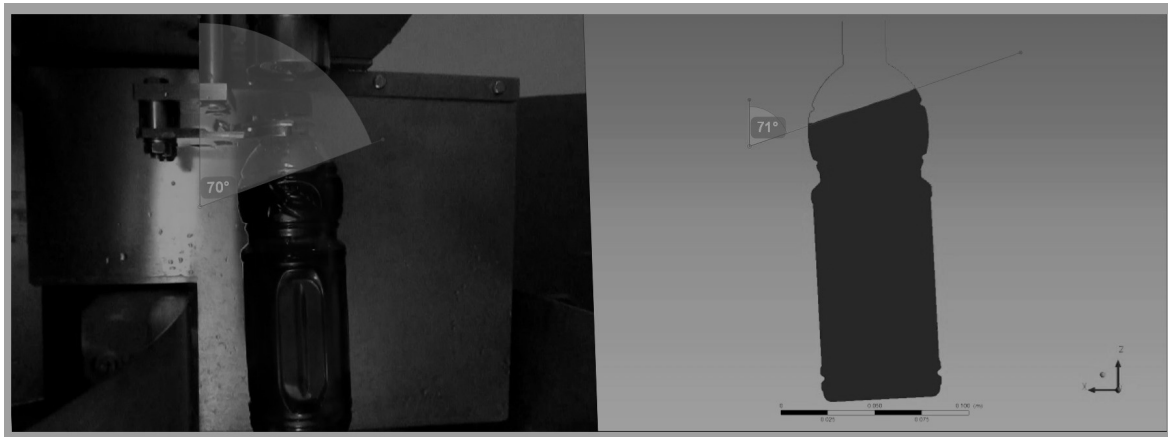


Figura 52 Validazione Caso 1

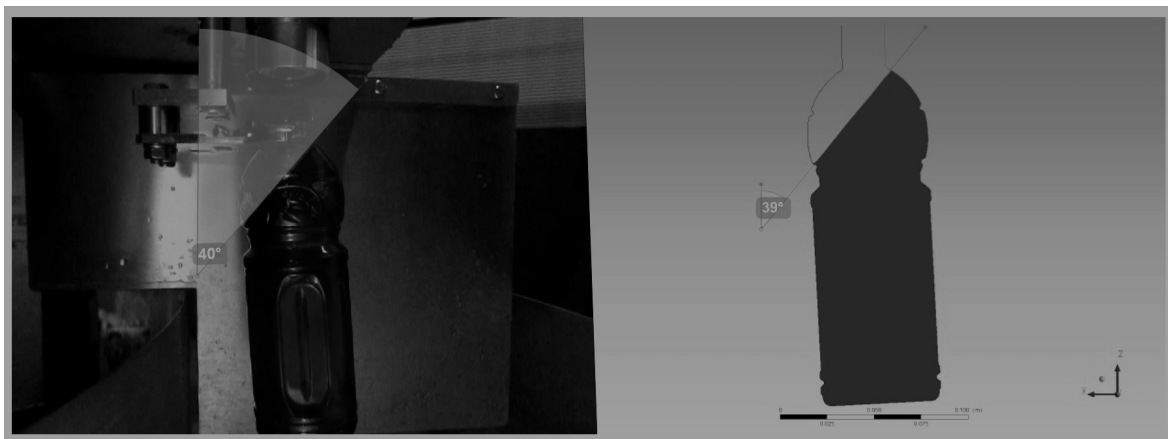


Figura 51 Validazione Caso 2

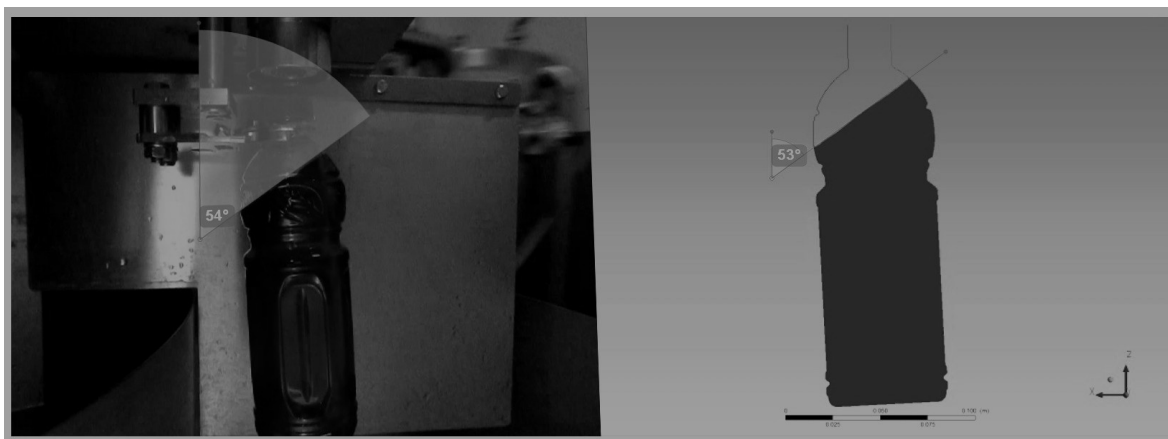


Figura 53 Validazione Caso 3

Caso	Velocità [giri/min]	Velocità [rad/s]	Accelerazione [m/s ²]	<u>Deflessione Test</u> [°]	<u>Deflessione CFD</u> [°]
1	20	2,094	3,158	<u>70</u>	<u>71</u>
2	30	3,142	7,106	<u>54</u>	<u>53</u>
3	40	4,189	12,633	<u>40</u>	<u>39</u>

Tabella 1 Validazione Statica

Come si evince sia dalle immagini che dalla tabella riassuntiva il modello numerico rispecchia e riproduce, con un alto grado di approssimazione, la realtà analizzata nel test.

Si può affermare che il modello è validato staticamente.

3.1.2 VALIDAZIONE DINAMICA

Raggiunta una validazione statica del modello si vuole ora verificare che quest'ultimo risponda correttamente anche sotto eccitazioni dinamiche, ossia il passaggio della bottiglia tra stelle consecutive.

Questo genera di prova, che si avvicina quanto più possibile ad una condizione di funzionamento reale del macchinario, richiede l'utilizzo di un banco prova rotativo multi stella:

tale banco è composto da 4 stelle con diametro primitivo di 720mm. Le circonferenze esterne di tali stelle sono tangenti in successione in modo da avere 4 punti di scambio per la bottiglia.

La movimentazione, come nel banco per la validazione statica, è effettuata da un motore elettrico ed una serie di ingranaggi che sincronizzano tutte le stelle. La velocità viene regolata mediante un potenziometro che regola la corrente diretta al motore.



Figura 54 Banco Rotativo 4 Stelle

Su ogni stella sono installate 5 pinze (anche se nel nostro caso ne basterebbe soltanto 1), distanziate con passo 113mm, che, grazie al corretto posizionamento delle camme di guida, permettono lo scambio delle bottiglie garantendo la permanenza di quest'ultime nel percorso chiuso formato dai 4 archi delle circonferenze primitive.

Quando il banco è attivo la bottiglia continua a percorrere tale cammino all'infinito.

Ciò che si vuole analizzare e riprendere è il passaggio della bottiglia da una stella all'altra.

In questo istante, come già esplicitato in precedenza, la forza centrifuga cambia istantaneamente verso ed il liquido si trova a reagire a questa brusca variazione.

Per riuscire a filmare ciò che succede all'interno della bottiglia è necessario, come nel caso della validazione statica, installare la fotocamera solidale con il movimento della bottiglia stessa.

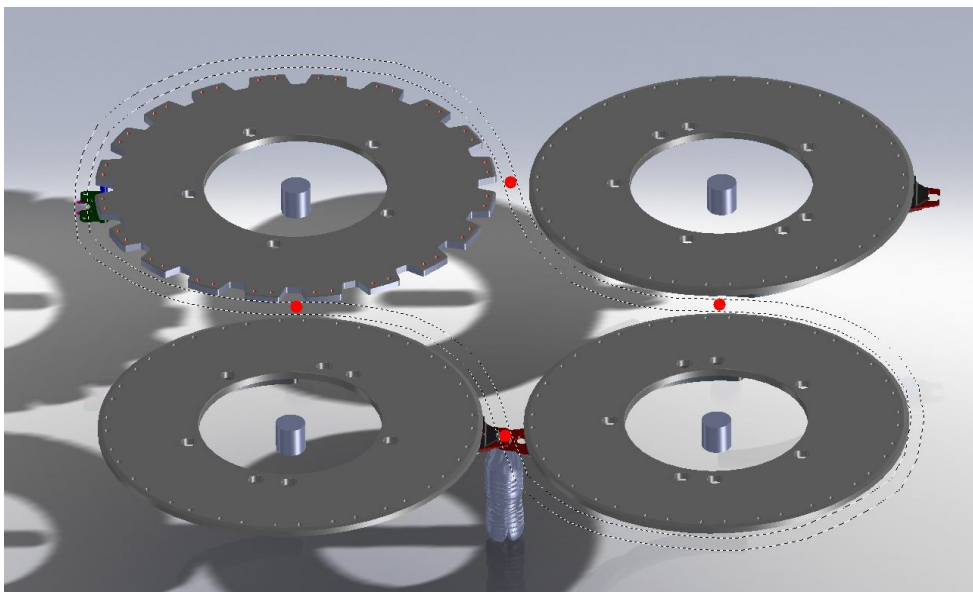


Figura 55 Modello CAD Banco con Scambi

In questo caso però la bottiglia si muove su più stelle e non è fisicamente/meccanicamente possibile inseguire quest'ultima su tutto il tragitto. Ciò che si è scelto di fare è individuare lo scambio più opportuno alla nostra indagine ed installare la telecamera in un alloggiamento per pinze non utilizzato. La telecamera riprenderà quindi gli istanti immediatamente precedenti e successivi allo scambio.

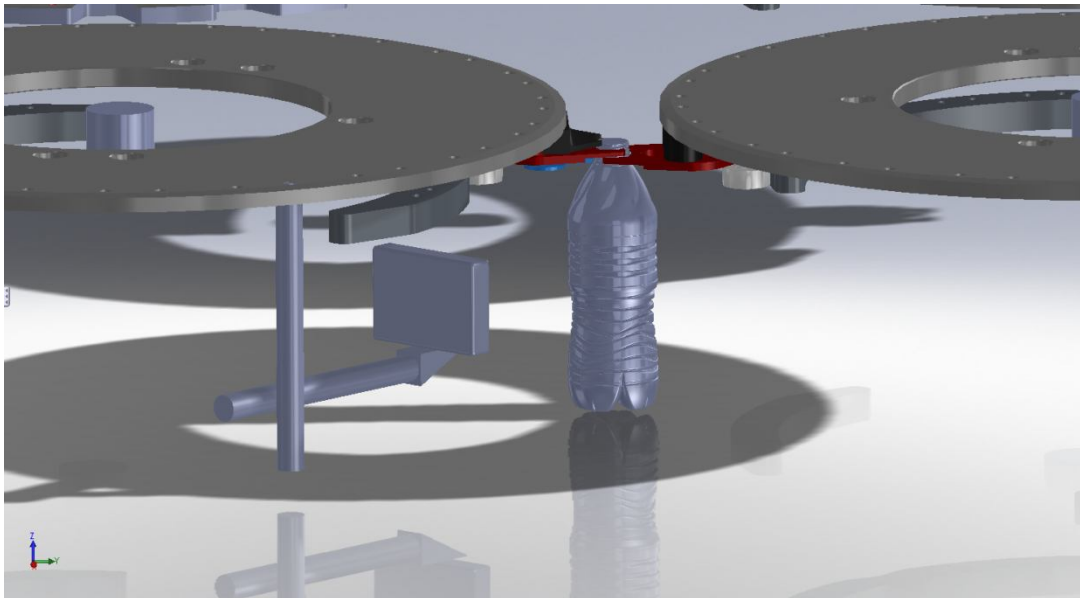


Figura 56 Modello CAD supporto Telecamera

Per fare ciò si è dovuto procedere con uno studio di verifica degli ingombri in quanto, installando la fotocamera (e quindi il relativo supporto) su una stella, si può incorrere in un crash tra gli elementi meccanici in movimento e le parti statiche (come le camme che regolano l'apertura delle pinze).

Si riportano a seguire alcuni fermi immagine dei vari test effettuati ed una tabella riassuntiva delle condizioni operative.

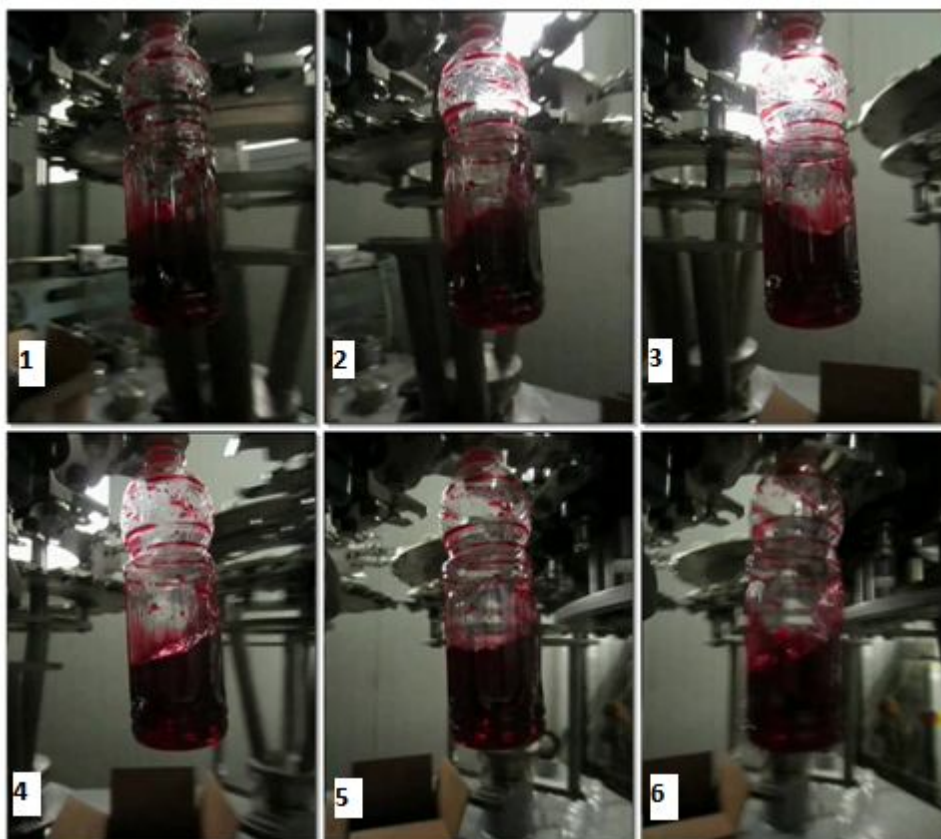


Figura 57 Snapshot Caso 2



Figura 58 Snapshot Caso 3

Caso	Tipo Bottiglia	Fill level [mm]	Produzione [bph]	Vel [giri/min]	Accelerazione [m/s ²]
1	1881hot fill 0,5L	138,75	24571	20,476	1,655
2	1881hot fill 0,5L	138,75	43000	35,833	5,069
3	1881hot fill 0,5L	48,24	24571	20,476	1,655
4	1881hot fill 0,5L	48,24	30714	25,595	2,586

Tabella 2 Condizioni Test Validazione Dinamica

Ciò che si intuisce immediatamente dall'analisi dei fotogrammi è che sulla bottiglia non avviene solamente un istantaneo cambio di forza centrifuga ma sono presenti urti, di entità non trascurabile, procurati dalle pinze all'atto dello scambio. Tali urti inducono un movimento rotatorio della bottiglia attorno al punto di presa delle chele.

Come notato nelle prove statiche, tra бага e pinza esiste un certo gioco massimo. Il movimento della bottiglia, all'interno di tale gioco, non è figlio solo delle forze centrifughe bensì esistono istanti in cui il contatto con le chele induce una rotazione di qualche grado anticipata rispetto al momento del puro scambio.

Tale rotazione anticipata perturba la superficie del fluido prima che avvenga l'inversione della forza centrifuga.

Quest'effetto perturbante risulta di fondamentale importanza sia ai fini della validazione del modello, sia per quanto riguarda l'analisi e la predizione dei fenomeni di sloshing nei macchinari in progettazione.

Si può quindi individuare un ulteriore set di parametri, funzione non solo delle

velocità di rotazione e livello di riempimento, ma anche delle caratteristiche geometriche e fasatura/regolazione di ogni singolo modello di pinza.

Alpha_min= escursione massima negativa;

Alpha_max= escursione massima positiva;

Delta_alpha= escursione rotazione anticipata;

Delta_T= tempo impiegata dalla bottiglia per passare da

Alpha_min ad Alpha_max;

Delta_2t= tempo impiegato dalla bottiglia per effettuare

Delta_alpha

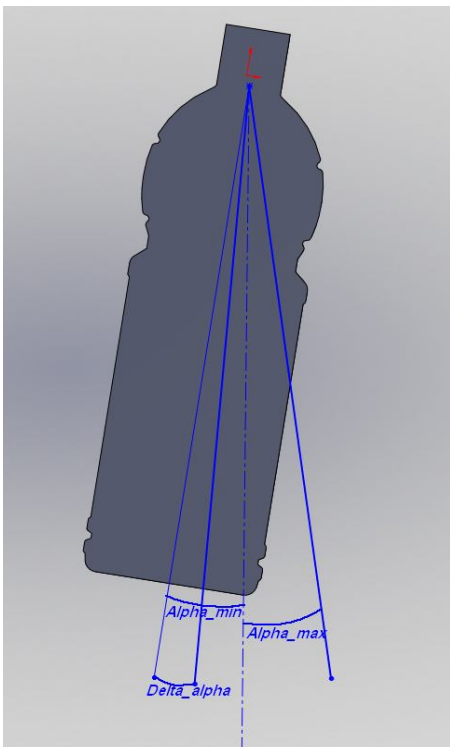


Figura 59 Parametri Angolari

In virtù delle analisi ai test effettuati si identificano, per le condizioni operative del banco prova, la mappatura sottostante per questa tipologia di parametri.

Caso	Alpha_min [deg]	Alpha_max [deg]	Delta_alpha [deg]	Delta_T [s]	Delta_2t [s]
1	-4	4	1	0,05	0,01
2	-4	4	4	0,03	0,01
3	-4	4	1	0,12	0,01
4	-4	4	2	0,07	0,01

Tabella 3 Parametri Rotativi

Si procede quindi inserendo questi parametri nella simulazione CFD.

Per fare ciò ci si avvale della funzionalità del software di poter applicare alle pareti uno spostamento imposto. Si identifica con la mediana del collo il centro di rotazione e si applica a tutti i punti appartenenti alle superfici con proprietà “wall” una matrice di rotazione dove l’angolo sarà funzione del tempo.

$$\begin{matrix} x' \\ y' \end{matrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{matrix} x \\ y \end{matrix}$$

(3.2)

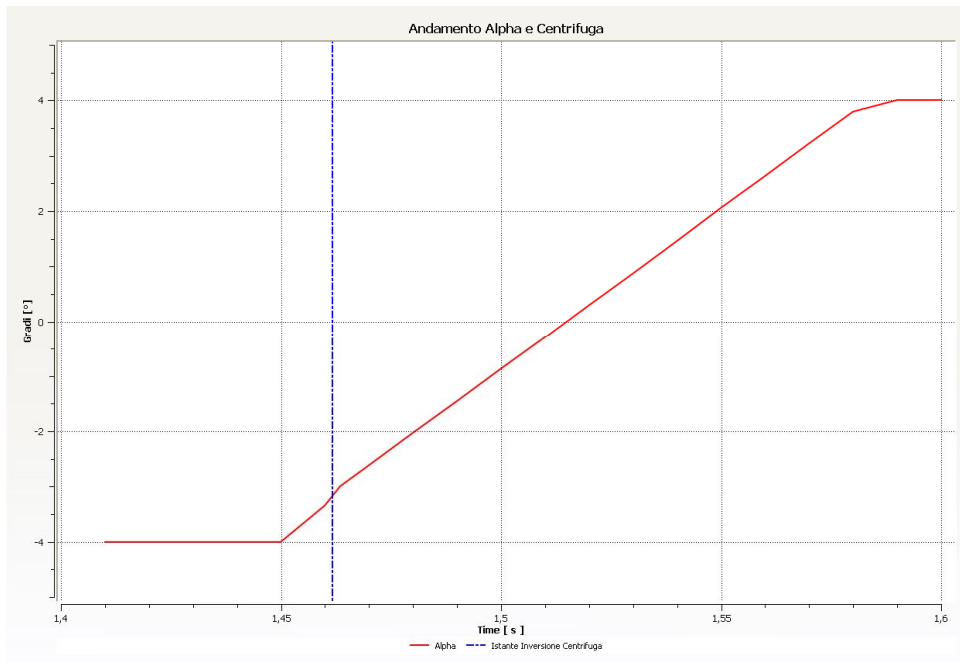


Figura 60 Andamento Angolo Alpha ed Inversione Forza Centrifuga

Nelle immagini a seguire si mettono a confronto fotogrammi catturati dalle riprese e il corrispettivo istante di tempo riprodotto dal software.

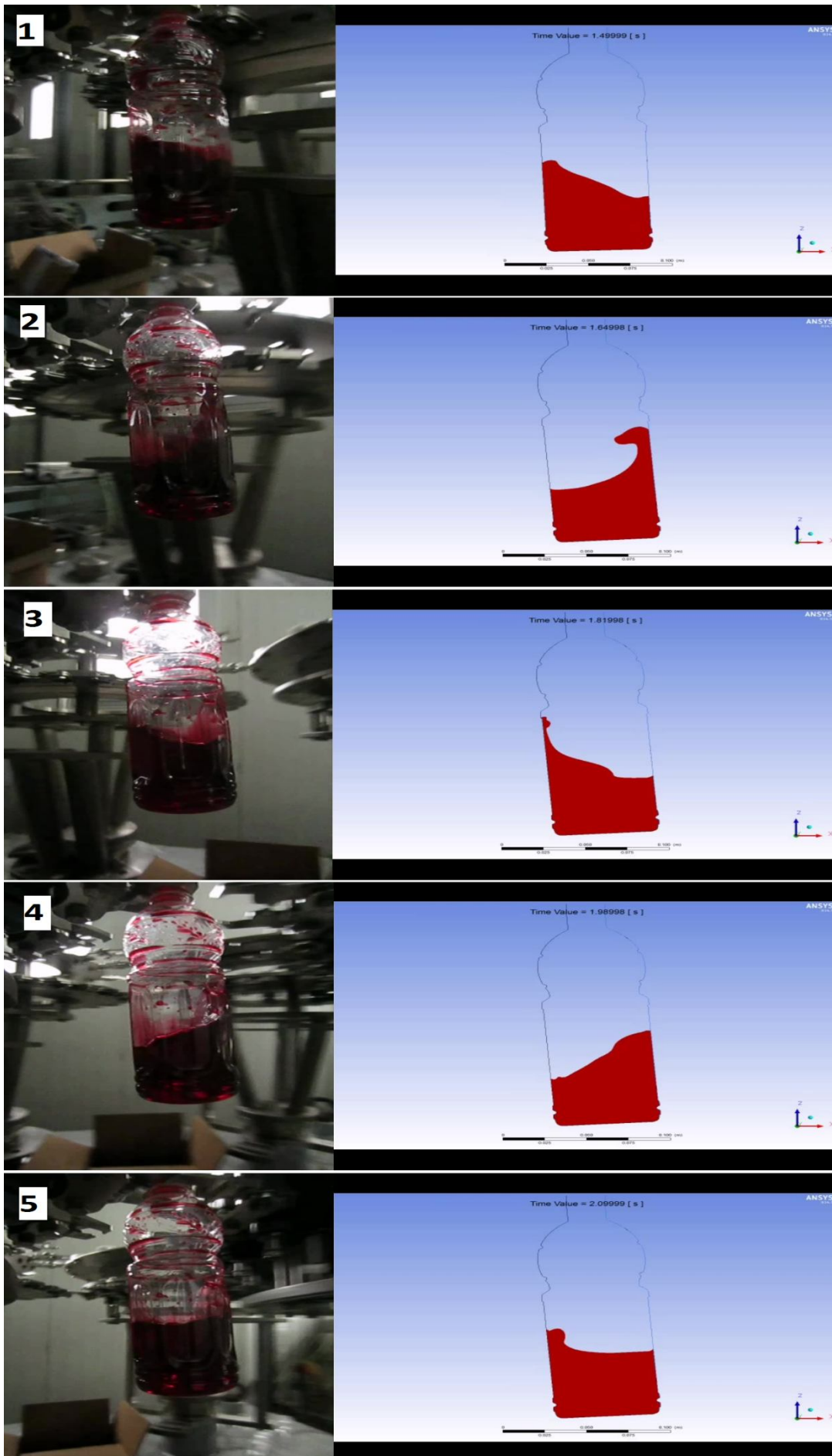


Figura 61 Validazione dinamica. Caso 1

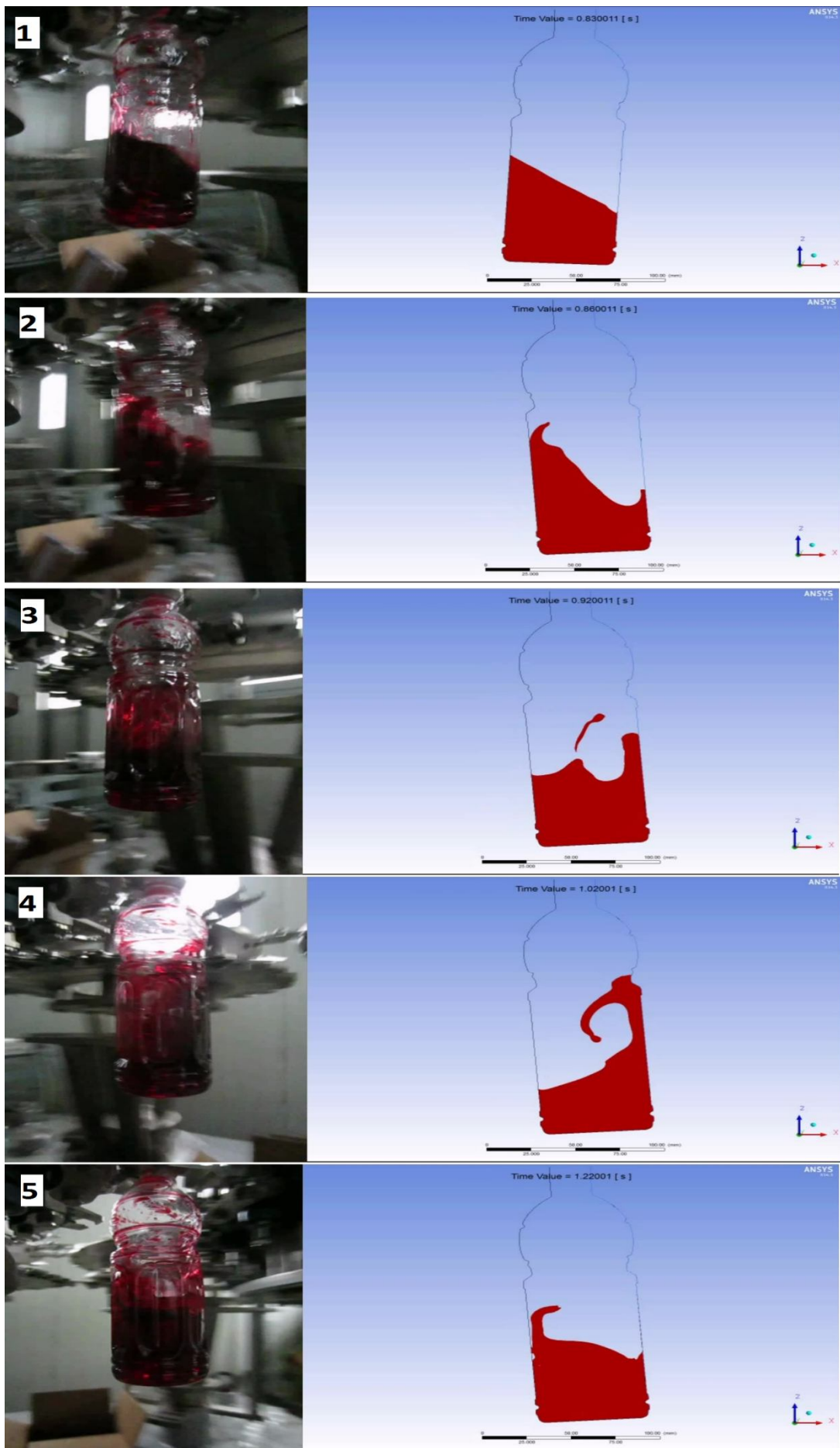


Figura 62 Validazione dinamica. Caso 2

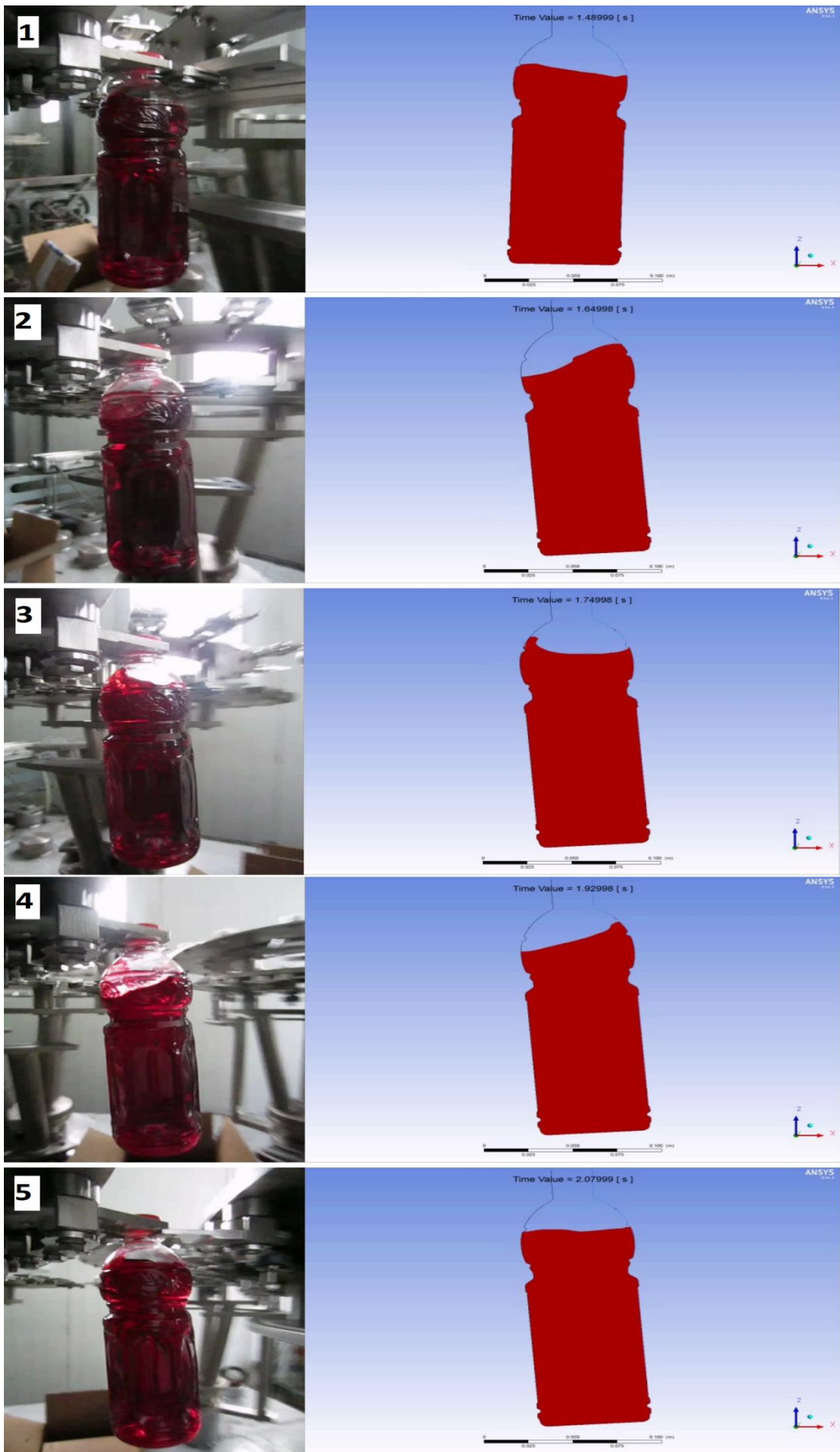


Figura 63 Validazione dinamica. Caso 3

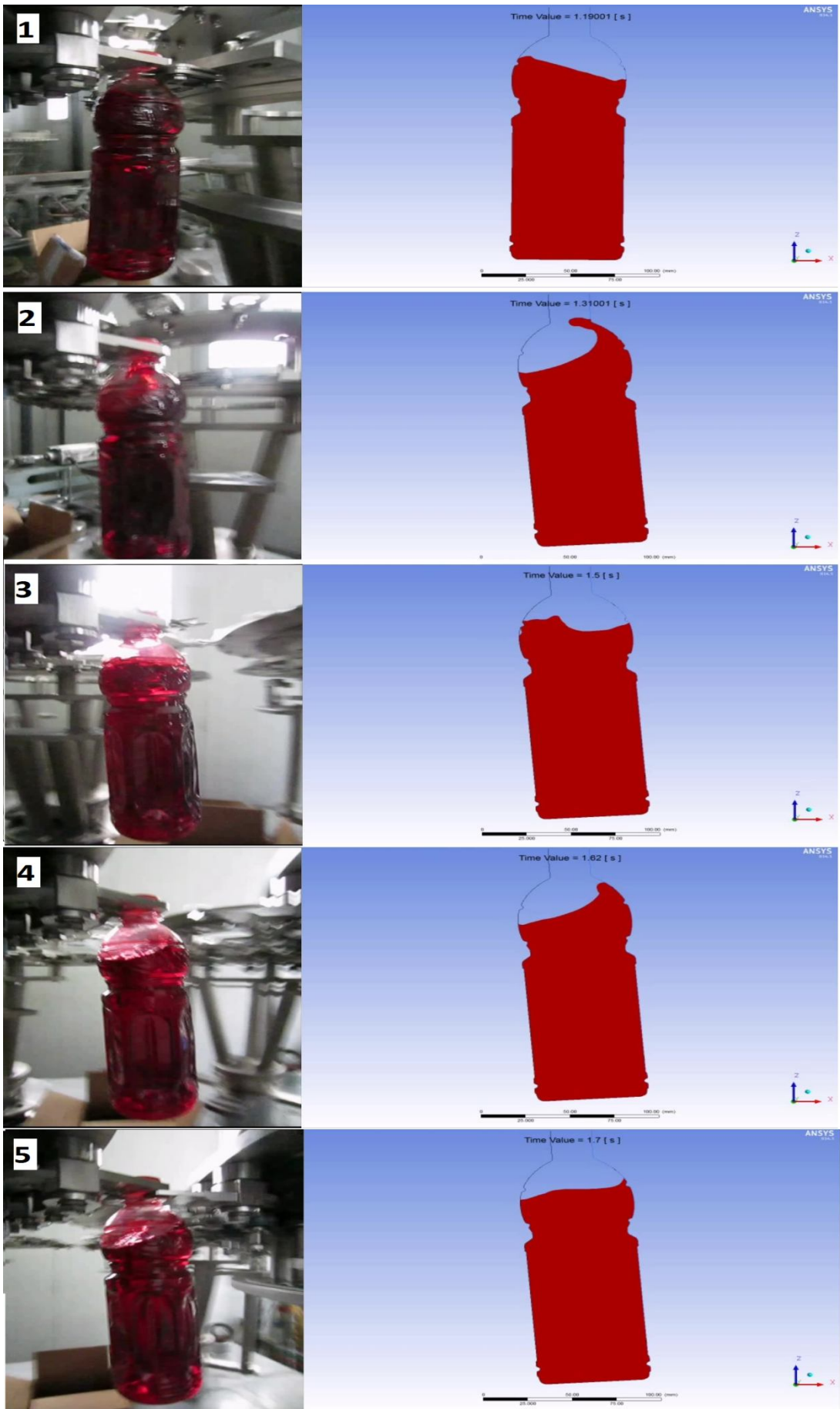


Figura 64 Validazione dinamica. Caso 4

Come si evince dalle immagini il modello numerico riproduce con buona fedeltà le condizioni registrate nel test.

Per una validazione rigorosa si analizzano e confrontano la frequenza delle oscillazioni del pelo libero e la sovranelungazione percentuale massima (percentuale calcolata rispetto al fill level) della prima oscillazione (massima ampiezza) rispetto alla condizione di regime (ossia la condizione già validata staticamente).

VALIDAZIONE DINAMICA			
CFD		Test	
case 1	<i>Fill Level [m]</i>	<u>0,13875</u>	
T [s]	Sovraelungazione Percentuale	T [s]	Sovraelungazione Percentuale
static	0		
1,64	<u>26,1</u>	1,66	<u>34,8</u>
1,82	-12,9		
1,96	14,1	2	6,0
2,13	-8,9		
Periodo [s]	Frequenza [Hz]	Periodo [s]	Frequenza [Hz]
0,32	<u>19,6</u>	0,34	<u>18,5</u>
case 2	<i>Fill Level [m]</i>	<u>0,13875</u>	
T [s]	Sovraelungazione Percentuale	T [s]	Sovraelungazione Percentuale
static	0		
1,02	<u>34,5</u>	1,05	<u>33,7</u>
1,21	-21,3	1,24	
1,39	21,7		
Periodo [s]	Frequenza [Hz]	Periodo [s]	Frequenza [Hz]
0,37	<u>17,0</u>	0,38	<u>16,5</u>

Tabella 4 Validazione Dinamica 1

VALIDAZIONE DINAMICA					
CFD			Test		
case 3		<i>Fill Level [m]</i>	<u>0,048235</u>		
T [s]	Sovraelungazione Percentuale		T [s]	Sovraelungazione Percentuale	
static		0			
	1,61	<u>24,9</u>	1,61		<u>36,3</u>
	1,76	-14			
	1,91	13,8	1,94		2,1
	2,05	-12,9			
Periodo [s]	Frequenza [Hz]		Periodo [s]	Frequenza [Hz]	
	0,3	<u>20,9</u>	0,33		<u>19</u>
case 4		<i>Fill Level [m]</i>	<u>0,048235</u>		
T [s]	Sovraelungazione Percentuale		T [s]	Sovraelungazione Percentuale	
static		0			
	1,35	<u>32,3</u>	1,34		<u>41,3</u>
	1,5	-28,6			
	1,62	22,8	1,66		10,2
	1,75	-21,6			
	1,9	12,1			
Periodo [s]	Frequenza [Hz]		Periodo [s]	Frequenza [Hz]	
	0,27	<u>23,3</u>	0,32		<u>19,6</u>
	0,28	<u>22,4</u>			

Tabella 5 Validazione Dinamica 2

Sulla parte sinistra della tabella vengono riportati i dati raccolti nelle simulazioni CFD mentre sulla destra quelli relativi ai Test di validazione.

Per entrambe le parti il valore nella colonna T[s] riporta l'istante temporale al quale viene identificato il picco di oscillazione.

A fianco è allegato il valore della sovranelungazione percentuale misurato (sono riportati sia picchi positivi che negativi). Si noti che nei casi CFD sono raccolti più valori rispetto ai Test reali: nei Test reali, per difficoltà grafiche, non è possibile misurare i picchi negativi.

Nelle ultime righe di ogni caso viene riportato il periodo di oscillazione (calcolato come la differenza tra gli istanti temporali di 2 picchi positivi consecutivi) e la frequenza propria di oscillazione, derivante dalla formula:

$$\mathbf{Frequenza} = \frac{2 \cdot \pi}{\mathbf{Periodo}} \quad (3.3)$$

Dal confronto delle grandezze nella tabella si nota quanto segue:

le frequenze hanno un errore (tra CFD e test) compreso tra 5-10% del valore della frequenza simulata. Tale errore può ritenersi sistematico e riconducibile principalmente all'imprecisione nelle misure.

La sovranelungazione percentuale massima differisce tra un valore minimo di -0.8% nel caso 2 ad un massimo di 11,4% nel caso 3.

L'errore in questo caso può essere riconducibile sia all'imprecisione nelle misure sia alla non perfetta ricostruzione della realtà tramite CFD, ossia il set dei parametri precedentemente illustrati non è perfettamente calibrato.

Tuttavia si noti che mentre i casi CFD sono perfettamente ripetibili nella realtà ogni scambio registrato ha delle differenze che possono tradursi in variazioni dell'ordine del 10/20%.

Non è quindi molto indicativo variare ad ogni registrazione il set dei parametri per ottenere un errore nullo. E' molto più efficace, anche in previsione di studi futuri, definire un set di parametri (funzione di velocità, fill level ecc) ed applicare un fattore correttivo che tenga conto delle variazioni massime che ogni singolo caso può subire.

Alla luce di queste considerazioni si può affermare che il modello numerico CFD risulta validato, con tutte le restrizioni illustrate, anche dinamicamente.

4

STUDIO PARAMETRICO

Validato il modello numerico CFD si può ora effettuare uno studio finalizzato ad individuare quali parametri abbiano maggior peso sui fenomeni di sloshing nelle bottiglie.

Si identificano a seguire questi parametri.

Su di essi si fonderanno tutte le successive analisi CFD.

Come già accennato in precedenza, la velocità di rotazione delle stelle (e quindi le forze centrifughe sulle bottiglie) dipende da:

- velocità di produzione;
- distanza (passo) tra le pinze;
- diametro primitivo;

Inoltre, come facilmente intuibile, due fattori fondamentali saranno:

- forma bottiglia;
- livello di riempimento (fill level. Altezza pelo libero).

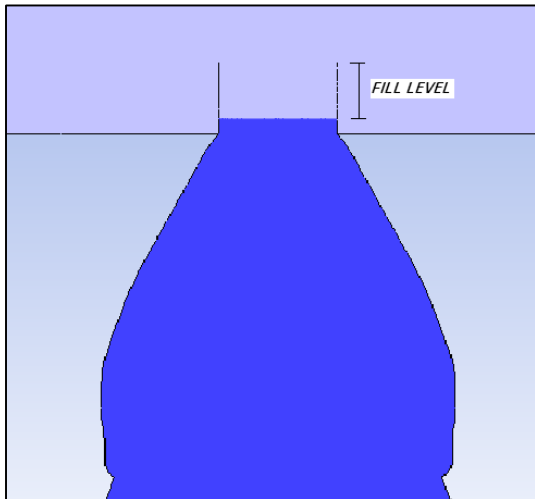


Figura 66 Fill Level

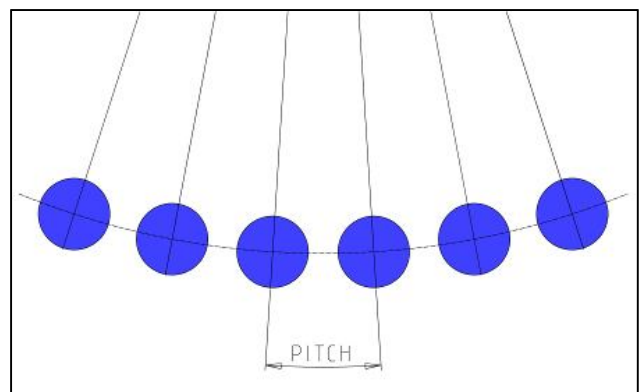


Figura 65 Passo

Dai test di validazione dinamica è stato verificato ed illustrato che sono presenti ulteriori parametri oltre a quelli sopracitati. Tali parametri, come già detto in precedenza, sono funzione non solo di velocità di rotazione e livello di riempimento ma soprattutto di caratteristiche geometriche e fasatura/regolazione di ogni singolo modello di pinza.

Nell'analisi a seguire si vogliono conseguire risultati che abbiano validità generale e non siano vincolati da singoli modelli di pinza o corrette/scorrette regolazioni/fasature.

Per tale motivo si è scelto di esulare le successive simulazioni da questi parametri.

Tuttavia un' analisi condotta indagando la variazione di ognuno dei fattori identificati richiederebbe moltissimo tempo e non aggiungerebbe informazioni significative ad un' analisi eseguita congelando, su configurazioni significative, alcuni di questi parametri.

Il primo parametro che viene fissato è la velocità di produzione.
 Essa viene posta a 72000bph, ossia la velocità di produzione massima.
 Sicuramente congelandoci su questa velocità non si rischia di sottostimare il fenomeno.

Il secondo parametro è il passo tra le pinze.

Viene posto a 94mm, ossia il passo minimo ammesso su una stella di trasferimento.

Definiti quindi questi 2 parametri è definito anche il numero di pinze presenti sulle stelle. Se ne riporta a seguire una tabella con diametri primitivi particolarmente significativi.

Velocità di Produzione [bph]	72000
Passo [mm]	94

Diametro Primitivo Stelle [mm]	Velocità di Rotazione [rev/min]	Numero Valvole
720	50	24
1080	33,3	36
1440	25	48

Tabella 6 Velocità rotazione & numero pinze

Terzo parametro fissato è la forma della bottiglia.

Viene selezionato un formato da 0,5 litri (produzione a 72000bph raggiungibile solo con questo genere di formati) che ha presentato problemi di fuoriuscita di prodotto su qualche macchinario.

Si noti che la bottiglia scelta non è la medesima utilizzata per le prove di validazione.

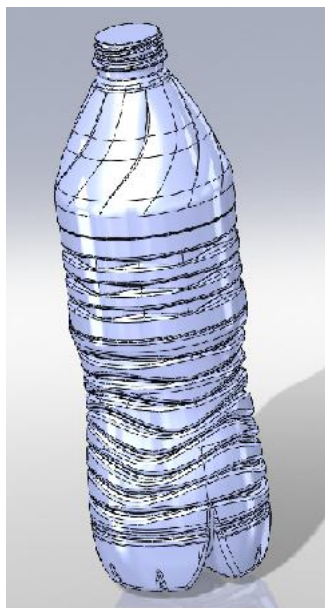


Figura 67 Bottiglia Analisi

I parametri sui quali sarà possibile agire saranno quindi:

- diametro primitivo stelle;
- fill level.

La variazione del diametro primitivo delle stelle si traduce in una variazione delle forze centrifughe che le bottiglie sentono sul percorso e differenti valori di fill level rappresentano varie altezze a riposo del pelo libero.

4.1 SIMULAZIONI

Completata la griglia di calcolo, e verificata la sua buona fattura, si possono impostare le simulazioni.

Ciò che si vuole individuare è la predominanza di un fattore rispetto agli altri. Non si hanno però a priori informazioni ne su quale possa essere questo fattore ne se, più che un singolo fattore, il fenomeno sia guidato da una combinazione di più fattori.

Per non escludere nessuna opzione viene svolta una campagna DOE (Design of Experiments) “full factorial”, ossia vengono investigate tutte le combinazioni delle variazioni di ogni fattore.

Un’analisi DOE è un approccio sistematico e rigoroso per la risoluzione dei più svariati problemi ingegneristici. Consiste fondamentalmente nell’applicare principi e tecniche statistiche durante la raccolta stessa dei dati in modo da generare conclusioni che possano, con buona probabilità, portare al miglioramento del processo stesso.

I parametri, identificati in precedenza, sono:

- diametro primitivo stella “cedente”(StarWheel 1);
- diametro primitivo stella “ricevente”(StarWheel 2);
- fill level.

Ogni parametro può assumere 3 variazioni: tali variazioni vengono definite utilizzando valori standard di progettazione.

Nella tabella sottostante si riportano tutte le combinazioni ottenute.

N. simulazione	Fill Level [mm]	Star Wheel 1 [mm]	Star Wheel 2 [mm]
1	10	720	720
2	10	720	1080
3	10	720	1440
4	10	1080	720
5	10	1080	1080
6	10	1080	1440
7	10	1440	720
8	10	1440	1080
9	10	1440	1440
10	17,5	720	720
11	17,5	720	1080
12	17,5	720	1440
13	17,5	1080	720
14	17,5	1080	1080
15	17,5	1080	1440
16	17,5	1440	720
17	17,5	1440	1080
18	17,5	1440	1440
19	20	720	720
20	20	720	1080
21	20	720	1440
22	20	1080	720
23	20	1080	1080
24	20	1080	1440
25	20	1440	720
26	20	1440	1080
27	20	1440	1440

Tabella 7 Analisi DOE Full Factorial

Come si evince dalla tabella si indagano in totale 27 casi.

4.2 ANALISI RISULTATI

Eseguite tutte le simulazioni preventivate si procede con una loro analisi.

Viene identificata una grandezza significativa che permetta di svolgere un'indagine statistica del fenomeno. Tale grandezza è la quantità di liquido che mediamente fuoriesce (ad ogni istante temporale) dalle superfici con proprietà di "opening".

Viene quindi creato un "monitor" che in tutti i casi effettua questa misurazione. Un' integrazione di questo dato (effettuata mediante metodo dei trapezi) fornisce la quantità totale di liquido fuoriuscito dalla bottiglia.

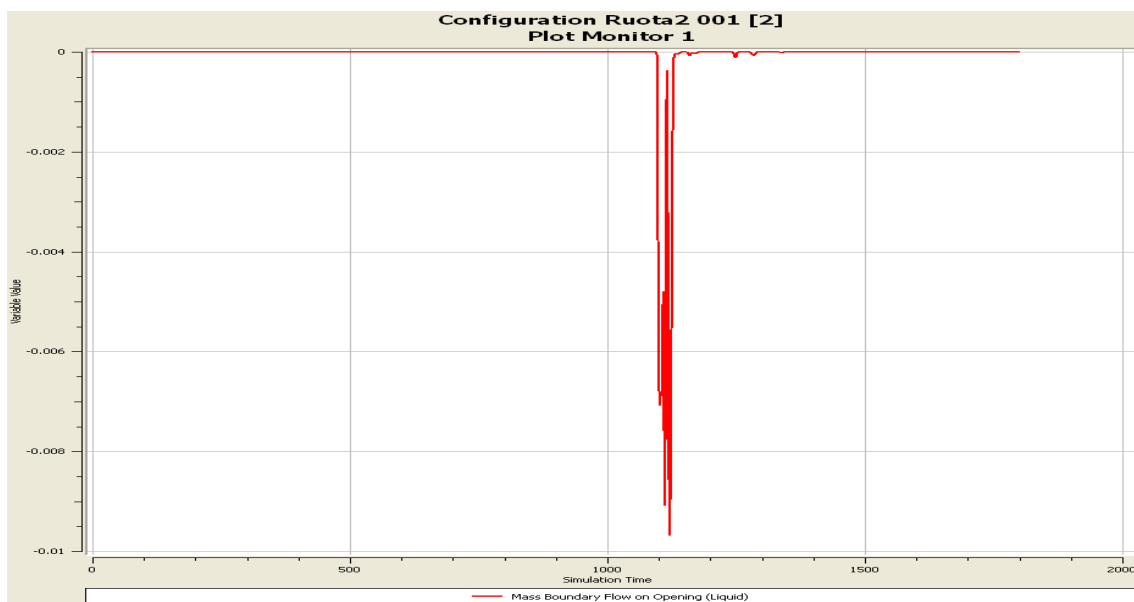


Figura 68 Monitor Fuoriuscita Liquido

Ricordiamo che il valore ricavato dall'integrazione non è significativo in termini di ordini di grandezza, in quanto tutte le analisi sono state svolte utilizzando un modello semplificato bidimensionale.

Si decide quindi di normalizzare questa misura utilizzando come valore di riferimento il massimo valore ottenuto (simulazione numero 1). Tutti i dati saranno quindi portati in una scala da 0 a 1.

Si riporta nel grafico sottostante il valore normalizzato della massa di fluido fuoriuscito dalla bottiglia, per ogni caso simulato.

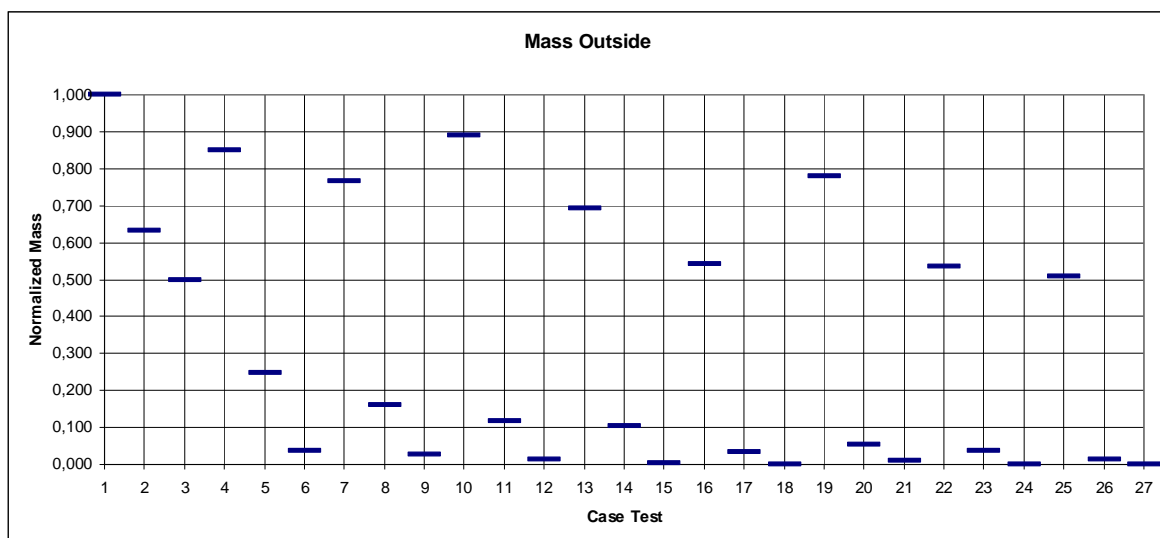


Figura 69 Raccolta Dati Normalizzati

Ciò che si vuole indagare sono le correlazioni che esistono tra questo valore ed i parametri di input.

Dal momento che si presentano condizioni favorevoli per effettuare una regressione lineare ai minimi quadrati, si decide di utilizzare questo approccio. Per fare ciò ci si avvale del software commerciale statistico Minitab.

La quantità di liquido uscita dalla bottiglia verrà assunta come variabile dipendente mentre i diametri primitivi delle stelle ed il fill level come variabili indipendenti.

Per essere certi di non trascurare nessun fattore, ne tanto meno un'eventuale combinazione di fattori, inizialmente si ricavano i coefficienti dell'equazione che in prima istanza assume questa forma:

$$y = \beta_0 + \beta_1 * X_1 + \beta_2 * X_2 + \beta_3 * X_3 + \beta_{11} * X_1^2 + \beta_{12} * X_1 * X_2 + \dots + \beta_{33} * X_3^2 \quad (4.1)$$

Dove:

y = Massa fuoriuscita normalizzata;

X_1 = Fill Level;

X_2 = Diametro primitivo prima stella (Star Wheel 1);

X_3 = Diametro primitivo seconda stella (Star Wheel 2);

β_i = coefficienti di regressione.

I coefficienti ricavati hanno valore :

<u>Term</u>	<u>Coef</u>
Constant	5,75907
Fill Level	-0,0972495
Star Wheel 1	-0,00214528
Star Wheel 2	-0,00531932
Fill Level*Fill Level	0,000632494
Star Wheel 1*Star Wheel 1	4,39733E-07
Star Wheel 2*Star Wheel 2	1,86156E-06
Fill Level*Star Wheel 1	4,08809E-05
Fill Level*Star Wheel 2	8,09272E-06
Star Wheel 1*Star Wheel 2	2,30320E-07

Tabella 8 Coefficienti Regressione Iniziale

Parallelamente ai coefficienti della regressione il software fornisce una serie di informazioni statistiche tra cui il “P-value”: tale valore rappresenta l’influenza del parametro di input nel caso che il parametro stesso sia omissso. Valori elevati di questo indicatore stanno quindi a significare che il parametro non influenza in modo rilevante la variabile dipendente. Di conseguenza tali parametri indipendenti possono essere omissi dall’equazione di regressione. Tale limite sul “P-value” viene in letteratura posto a 0,005.

Si riportano nella tabella sottostante i valori di tale indicatore:

<u>Source</u>	<u>P</u>
Constant	0,022
Fill Level	0,000
Star Wheel 1	0,000
Star Wheel 2	0,000
Fill Level*Fill Level	0,738
Star Wheel 1*Star Wheel 1	0,108
Star Wheel 2*Star Wheel 2	0,000
Fill Level*Star Wheel 1	0,005
Fill Level*Star Wheel 2	0,531
Star Wheel 1*Star Wheel 2	0,226

Tabella 9 P-Value 1

Dalla tabella si nota come alcuni fattori siano sopra il valore limite.

Essi possono essere eliminati dal calcolo della regressione ma ciò può essere fatto solo iterativamente: infatti, escludendo anche un solo parametro, la regressione assume una forma differente con coefficienti e P-value concordi alla nuova parametrizzazione.

Ad ogni iterazione deve quindi essere valutata se esiste una variabile scartabile, indipendentemente dalle informazioni ricevute nelle iterazioni precedenti.

Di seguito vengono riportati i P-value, dove ad ogni iterazione viene eliminato un parametro secondo il criterio del valore massimo.

Iterazione 1

Constant	0,022
Fill Level	0,000
Star Wheel 1	0,000
Star Wheel 2	0,000
Fill Level*Fill Level	0,738
Star Wheel 1*Star Wheel 1	0,108
Star Wheel 2*Star Wheel 2	0,000
Fill Level*Star Wheel 1	0,005
Fill Level*Star Wheel 2	0,531
Star Wheel 1*Star Wheel 2	0,226

Iterazione 2

Term	P
Constant	0,001
Fill Level	0,000
Star Wheel 1	0,000
Star Wheel 2	0,000
Star Wheel 1*Star Wheel 1	0,099
Star Wheel 2*Star Wheel 2	0,000
Fill Level*Star Wheel 1	0,004
Fill Level*Star Wheel 2	0,127
Star Wheel 1*Star Wheel 2	0,213

Iterazione 3

Term	P
Constant	0,001
Fill Level	0,000
Star Wheel 1	0,000
Star Wheel 2	0,000
Star Wheel 1*Star Wheel 1	0,103
Star Wheel 2*Star Wheel 2	0,000
Fill Level*Star Wheel 1	0,004
Fill Level*Star Wheel 2	0,527

Iterazione 4

Term	P
Constant	0,001
Fill Level	0,000
Star Wheel 1	0,000
Star Wheel 2	0,000
Star Wheel 1*Star Wheel 1	0,098
Star Wheel 2*Star Wheel 2	0,000
Fill Level*Star Wheel 1	0,527

Iterazione 5

Term	P
Constant	0,000
Fill Level	0,000
Star Wheel 1	0,000
Star Wheel 2	0,000
Star Wheel 2*Star Wheel 2	0,000
Fill Level*Star Wheel 1	0,005

Tabella 10 P-Value Iterativi

Alla quinta iterazione tutti i parametri sono sotto il valore limite quindi la loro influenza nella regressione non può essere trascurata.

La regressione assume quindi l'espressione

$$y = \beta_0 + \beta_1 * X_1 + \beta_2 * X_2 + \beta_3 * X_3 + \beta_{33} * X_3^2 + \beta_{12} * X_1 * X_2 \quad (4.2)$$

Dove i coefficienti hanno valore:

<u>Term</u>	<u>Coef</u>
Constant	4,75245
Fill Level	-0,0698995
Star Wheel 1	-9,46714E-04
Star Wheel 2	-0,00494244
Star Wheel 2*Star Wheel 2	1,86156E-06
Fill Level*Star Wheel 1	4,08809E-05

Tabella 11 Coefficienti Regressione Finali

Di seguito vengono riportate le informazioni statistiche che il software fornisce sulla qualità e validità della regressione.

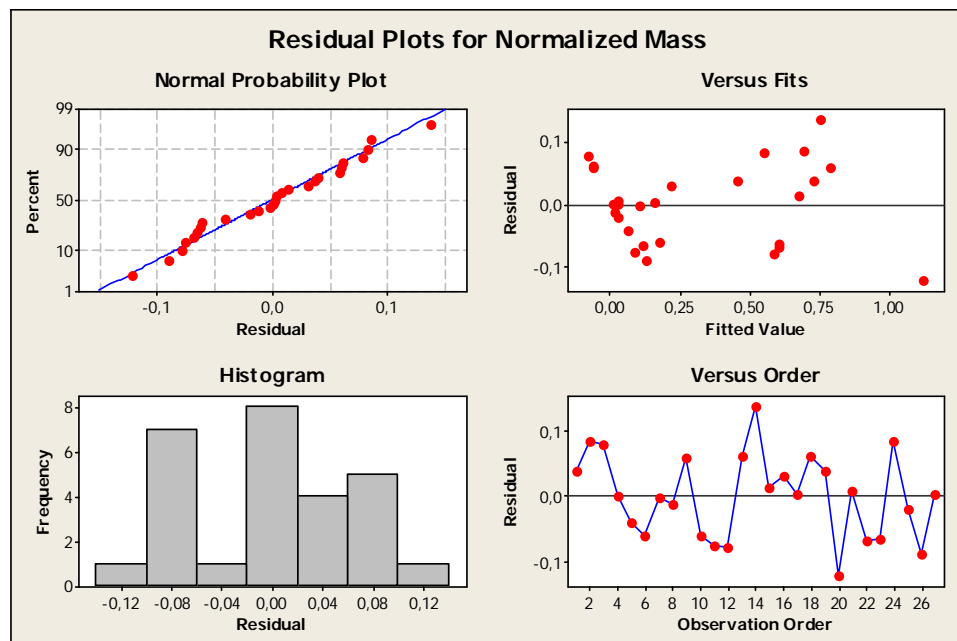


Figura 70 Residui

I residui, ossia la differenza tra valore stimato e osservato, hanno un andamento casuale. Ciò conferma la validità della regressione lineare.

A questo punto, creata una relazione matematica che riflette analiticamente ciò che è stato osservato dalle simulazioni CFD, possiamo analizzare e determinare nel dettaglio l'influenza ed il peso dei parametri indipendenti rispetto alla variabile dipendente.

Per fare ciò si sfruttano le rappresentazioni bidimensionali (“contour plot”, superfici di livello) che la regressione permette di tracciare. Si fissa quindi un parametro (nel nostro caso il parametro fissato assume il valore minimo ammissibile, ossia con criticità massima) e si assegnano gli assi delle ascisse e delle ordinate ai due parametri restanti. Si tracciano quindi nel piano le linee lungo i punti che hanno medesimo valore della variabile dipendente.

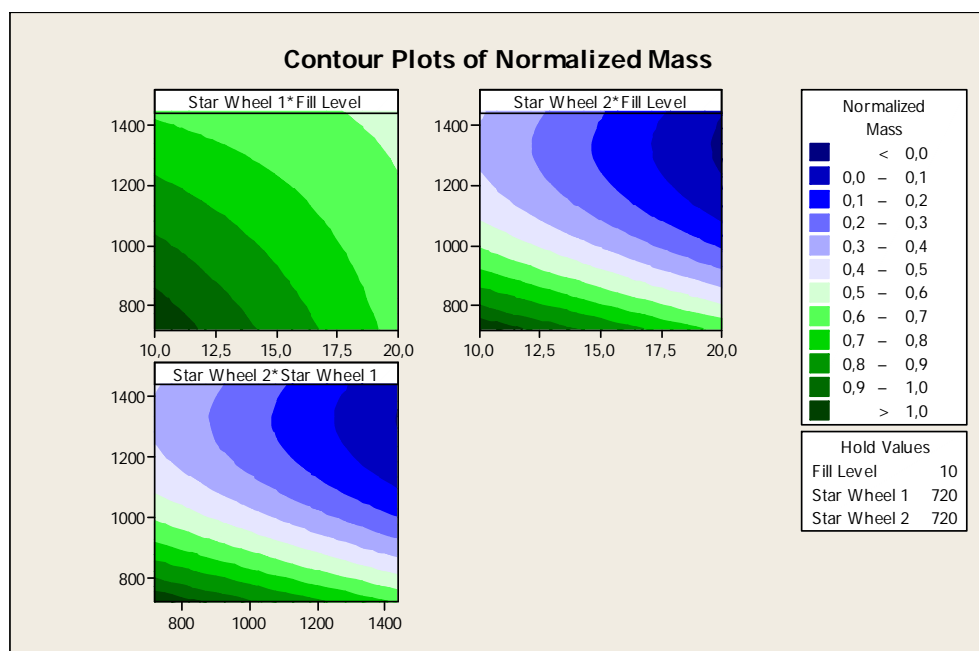


Figura 71 Contour Plot

Da questi grafici possono essere tratte considerazioni fondamentali:

Il primo, dove abbiamo Fill Level sull'ascissa e StarWheel1 sull'ordinata, mostra che le isolinee della variabile dipendente seguono approssimativamente delle rette con angolazione 45°. Ciò significa che le variazioni dei 2 parametri hanno la medesima influenza sulla variabile dipendente.

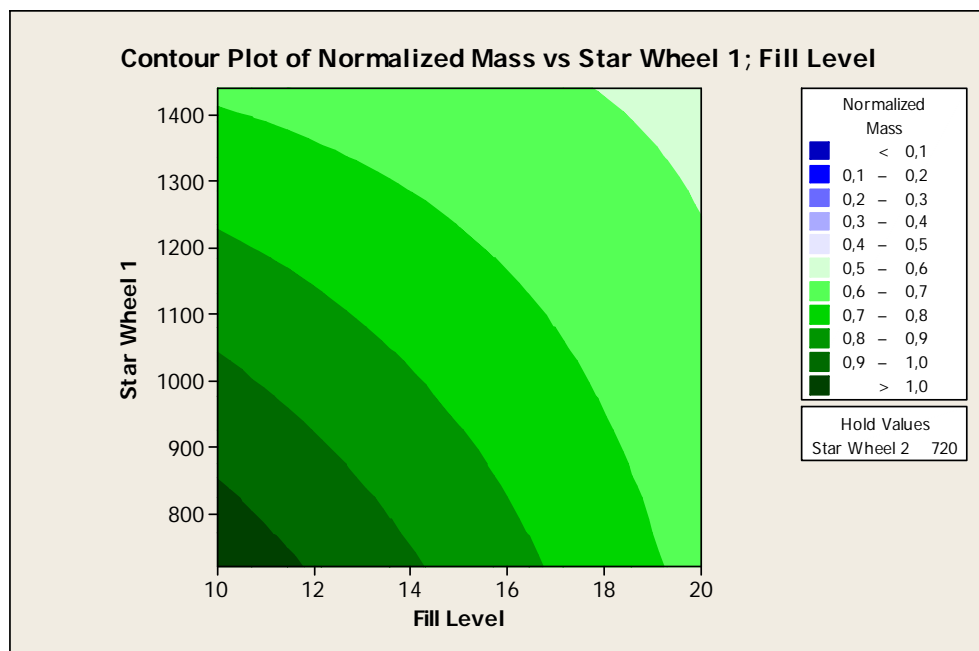


Figura 72 Contour Plot 1

Il secondo rivela invece una situazione del tutto differente. Sull'asse delle ascisse abbiamo Fill Level mentre in ordinata StarWheel2.

Le isolinee hanno angolazione superiore ai 45° . Muovendoci quindi sull'asse delle ordinate si verifica una variazione sulla variabile dipendente superiore di quanto non accada muovendoci sull'asse delle ascisse.

L'influenza che quindi ha il parametro StarWheel2 sul fenomeno è decisamente superiore rispetto al Fill Level.

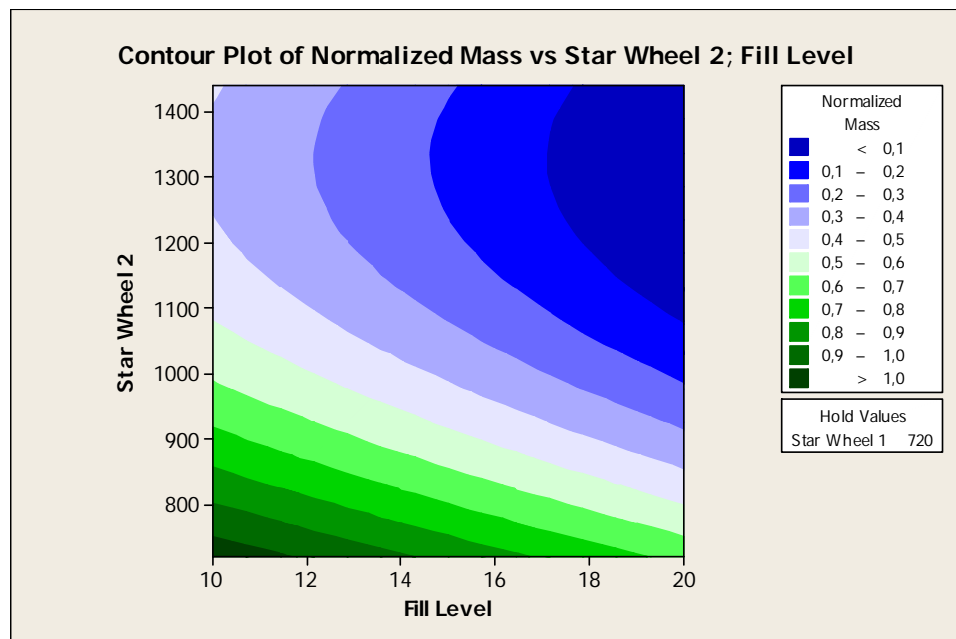


Figura 73 Contour Plot 2

Il terzo grafico presenta una situazione del tutto analoga con quanto osservato nel precedente.

In questo caso abbiamo StarWheel1 sulle ascisse e StarWheel2 sulle ordinate. Anche in questo caso le isolinee hanno inclinazione superiore ai 45°. Ciò comporta un peso del parametro StarWheel2 superiore al peso del parametro StarWheel1.

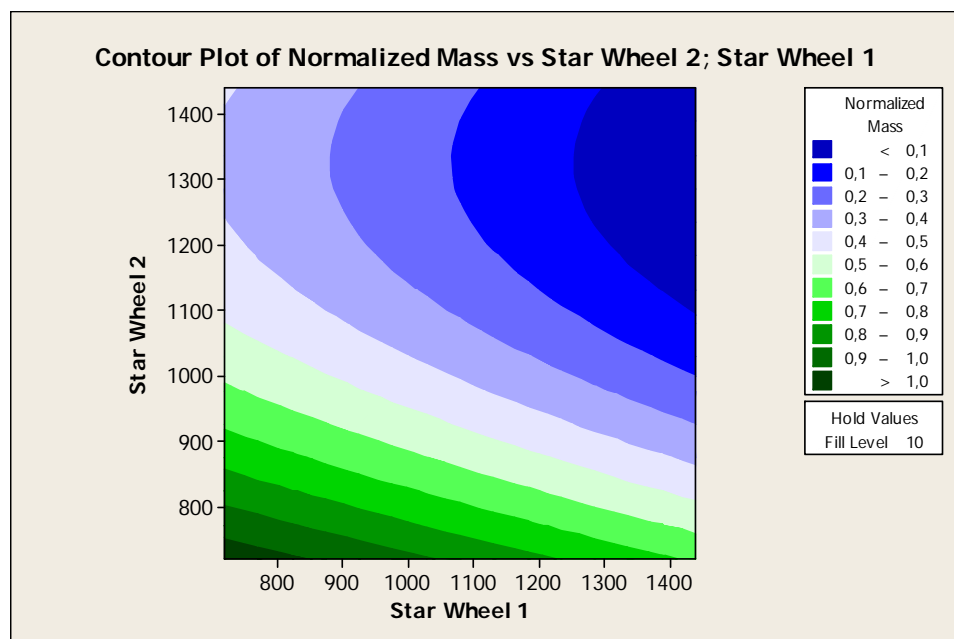


Figura 74 Contour Plot 3

5 CONCLUSIONI

Lo studio svolto in questa tesi è rivolto all'indagine delle problematiche di "sloshing" all'interno del processo di riempimento industriale

Tale attività ha portato alla creazione e validazione di un modello numerico CFD. Il modello è stato successivamente utilizzato allo scopo di individuare, mediante un'indagine statistica, se esista una variabile legata ai fenomeni di sloshing che predomini sulle altre.

Come evidenziato nell'ultima parte dello studio parametrico esiste un fattore che predomina gli altri due.

Tale fattore è il diametro primitivo della seconda stella, ossia la stella ricevente nella simulazione dello scambio. Ciò non significa che i restanti due fattori non abbiano nessuna influenza sul manifestarsi del fenomeno bensì che una variazione del diametro primitivo della stella ricevente ha un impatto più elevato sull'insorgere o attenuare il problema dello sloshing.

Questo risultato fornisce importanti indicazioni sulle future configurazioni di macchina: a parità di ingombro concesso è decisamente più conveniente ampliare il secondo diametro primitivo anziché il primo. Ampliando il secondo diametro si può quindi marginare l'abbassamento del livello di riempimento, via che rimane comunque percorribile come soluzione a layout macchina definito.

E' importante comunque sottolineare che l'analisi parametrica sui tre fattori è stata effettuata in condizioni ideali, che non riflettono a pieno la realtà ed il vero funzionamento macchina.

Come infatti è stato notato dalle prove di validazione dinamica esistono altri parametri, funzione di componenti meccanici, come le pinze e le camme, che influenzano notevolmente le problematiche di sloshing.

Tali parametri sono stati notati e dedotti durante le prove dinamiche ma non è stata condotta un'indagine accurata volta all'identificazione esatta.

Un'implementazione futura del modello richiederà sicuramente ulteriori prove volte alla caratterizzazione e stima di tali parametri aggiuntivi.

Tuttavia i parametri ricavati forniscono grandi informazioni e suggeriscono che la mitigazione dei fenomeni dei sloshing deve tener conto di queste ulteriori caratteristiche meccaniche.

A prova di ciò si confrontino le immagini sottostanti: in entrambe le simulazione vengono applicate condizioni operative registrate su un macchinario a pieno regime di produzione.

Nel primo caso la simulazione ha le medesime impostazioni utilizzate per lo studio parametrico. Nel secondo vengono aggiunti i parametri rotativi individuati per la validazione dinamica.

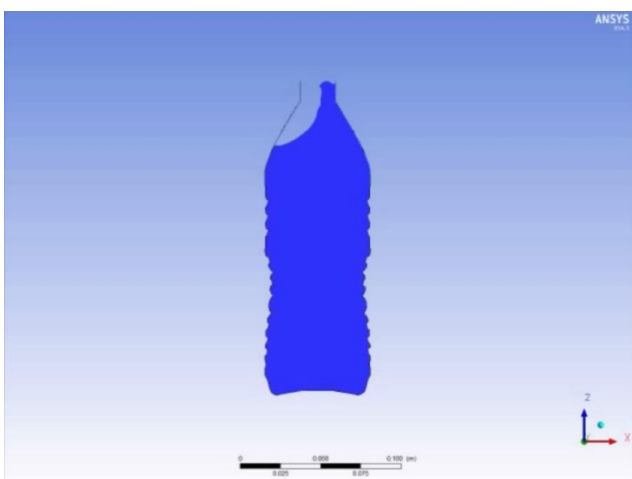


Figura 76 Bottiglia Studio Parametrico

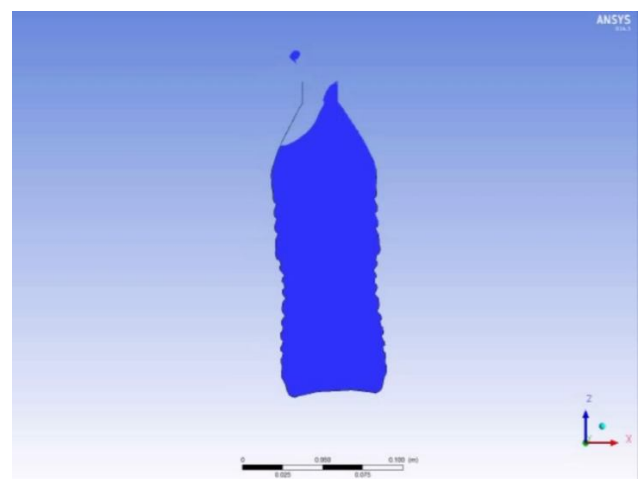


Figura 75 Bottiglia Parametri Rotativi

Nel primo caso non si registra fuoriuscita di prodotto. Nel secondo caso la fuoriuscita è evidente.

Dati ricevuti dal macchinario installato (non pubblicabili) suggeriscono che l'applicazione dei parametri rotativi avvicina molto la simulazione CFD alla realtà.

Un' ulteriore problematica riscontrata risiede nel banco prova rotativo utilizzato per la validazione dinamica: nonostante la validazione abbia dato esito positivo il banco non risulta particolarmente idoneo per prove dove sono implicati scambi bottiglia.

Il banco infatti è stato progettato ed ideato per prove di affidabilità ed endurance di componenti come le pinze. Al momento dell'utilizzo tale banco aveva effettuato diverse migliaia di cicli.

Ciò comporta che le fasature e tutte le regolazioni corrette per lo scambio fossero già evidentemente compromesse e le differenze dalle condizioni di funzionamento, su macchinari reali, notevoli.

Questo si è tradotto in una ripetibilità degli scambi decisamente ridotta (vedi scambio errato in Figura 77).



Figura 77 Scambio Errato

Inoltre, affinché gli scambi possano essere effettuati fisicamente, è stato necessario operare in condizioni lontane da quelle nei macchinari reali. Livelli di riempimento reali non permettevano velocità di rotazione paragonabili alla realtà. Si è quindi scelto di svolgere i test con le velocità più elevate (comunque basse rispetto alle condizioni operative dei macchinari completi: 35,8 rpm contro 50 rpm) con la bottiglia riempita a solo $\frac{1}{2}$ del volume. Ciò comporta un minore peso della bottiglia (e quindi uno scambio agevolato) ma anche un abbassamento del baricentro che equivale ad una predisposizione molto elevata alle rotazioni.

Tutte le condizioni sopra citate si traducono in situazioni aggravanti per il corretto sviluppo dei test.

Si deve inoltre notare che, per quanto la validazione abbia avuto esito positivo, un modello 2D avrà sempre delle limitazioni rispetto ad un modello 3D che riproduce l'intera geometria.

Finché lo scopo delle simulazioni è indagare la variazione di certi parametri il modello 2D è, al momento attuale, imprescindibile.

Un modello tridimensionale completo resta comunque consigliabile nel caso si voglia riprodurre numericamente, con alta precisione, ciò che accade realmente nei macchinari.

Ultima osservazione nata dallo studio condotto in questa tesi riguarda la forma della bottiglia: sia dalle simulazioni che dai test emerge che le geometrie della bottiglia sono di fondamentale importanza. Ulteriori studi potrebbero essere rivolti all'analisi della forma in modo da rendere la bottiglia stessa parte del sistema di mitigazione del fenomeno

BIBLIOGRAFIA

- [1] www.sidel.com
- [2] Sidel SpA, *EUROTRONICA FM-C, EUROTRONICA FM-LT: Monoblocchi per il riempimento di bottiglie in PET*;
- [3] Sidel SpA, *Use and maintenance manual for EUROTRONICA FM-C*;
- [4] Quartapelle, Auteri (2008), *Fluidodinamica*, MILANO;
- [5] Randall J Leveque (1992), *Numerical Methods for Conservation Laws*.
- [6] S.Verlag (1999), *Computational methods for Fluid Dynamics*;
- [7] R.T. Edwards (2004), *An introduction to multigrid methods*;
- [8] M.Toumi (2008), *Etude et analyse de la stabilité des camions citernes*,JUILLET;
- [9] ANSYS, *CFX user's guide*;
- [10] M.F.M. Lima, J.A.T. MACHADO (2010), *Fractional dynamics in liquid manipulation*;
- [11] M.H. Djavareshkian, M. Khalili (2006), *COMPARISON OF FINITE VOLUME AND PENDULUM MODELS FOR SIMULATION OF SLOSHING*, ISFAHAN;
- [12] Grundelius (2001), *Methods for Control of Liquid Slosh*, LUND;