



**Università  
degli Studi  
di Ferrara**

**DOTTORATO DI RICERCA IN  
"SCIENZE DELL'INGEGNERIA"**

CICLO XXXII

COORDINATORE Prof. Stefano Trillo

**Termofluidodinamica applicata ai processi industriali di  
pastorizzazione e raffreddamento**

Settore Scientifico Disciplinare ING-IND/08

**Dottorando**

Dott. Dainese Devid

**Tutore**

Prof. Pinelli Michele

---

*(firma)*

---

*(firma)*

Anni 2017/2019







# Indice

Abstract.....	9
Indice delle Figure .....	11
Indice delle Tabelle.....	17
Obiettivo della Tesi.....	19
Originalità e Contributi degli Altri .....	21
1 Capitolo 1 Pastorizzazione e Raffreddamento .....	23
1.1 Pastorizzazione: processo termico .....	23
1.2 Tecniche di pastorizzazione .....	26
1.3 Macchine a tunnel per la pastorizzazione .....	35
1.4 Controllo della UP a fine pastorizzazione .....	40
1.5 Cooling per linee hot fill .....	41
2 Capitolo 2 Pastorizzazione e Raffreddamento: Modelli numerici .....	43
2.1 Modellazione numerica del processo termico di pastorizzazione .....	43
2.2 Equazioni del modello numerico dello scambio termico.....	47

2.3	Analisi di scala e ipotesi semplificative per la soluzione del modello .....	50
2.4	Algoritmo di calcolo per ottenere la soluzione del modello .....	58
2.5	Altri modelli numerici per sistemi di pastorizzazione a tunnel .....	64
2.6	Modelli numerici per il processo di raffreddamento.....	66
2.7	CFD per il raffreddamento di fluidi imbottigliati .....	68
3	Capitolo 3 Banco Prova Sperimentale per ciclo di Pastorizzazione e Raffreddamento .....	77
3.1	Studio del problema .....	77
3.2	Approssimazioni necessarie e caratteristiche essenziali per la realizzazione del banco prova.....	78
3.3	Dimensionamento piano di appoggio .....	81
3.4	Impianto idrico banco prova .....	82
3.5	Sistema di misura Banco Prova .....	87
3.5.1	Misure di Portata.....	87
3.5.2	Misure di Temperatura.....	89
3.5.3	Misure di Pressione.....	95
3.6	Pattern di spruzzatura e Ugelli.....	97
3.7	PLC e Acquisizione Dati .....	101
3.8	Ciclo di pastorizzazione o Ciclo di raffreddamento .....	104
3.9	Messa in opera del banco prova.....	105
4	Capitolo 4 Analisi sperimentale dei processi di pastorizzazione per il prodotto birra .....	109
4.1	Definizione del prodotto birra sottoposto a trattamento termico.....	109

4.2	Descrizione della procedura del test nella camera di prova.....	111
4.2.1	Posizionamento dei campioni sul piano della camera di prova .....	112
4.2.2	Strumentazione dei campioni da sottoporre ai test .....	113
4.2.3	Definizione delle variabili da verificare durante il test.....	115
4.2.4	Scrittura della ricetta per il test .....	116
4.3	Test di pastorizzazione della birra .....	117
4.4	Risultati sperimentali dei test condotti sul prodotto birra.....	121
4.4.1	Birra nelle bottiglie di vetro da 330 ml .....	121
4.4.2	Birra nelle bottiglie di vetro da 660 ml .....	123
4.4.3	Birra nelle lattine di alluminio da 330 ml .....	125
4.4.4	Birra nelle lattine di alluminio da 500 ml .....	127
4.5	Conclusioni e Osservazioni .....	129
5	Capitolo 5 Analisi sperimentale dei processi di pastorizzazione per i prodotti del gruppo succhi di frutta.....	131
5.1	Definizione del prodotto succo di frutta sottoposto a trattamento termico ....	131
5.2	Descrizione della procedura del test nella camera di prova.....	133
5.2.1	Posizionamento dei campioni sul piano della camera di prova .....	134
5.2.2	Strumentazione dei campioni da sottoporre ai test .....	135
5.2.3	Definizione delle variabili da verificare durante il test.....	137
5.3	Test di raffreddamento dei succhi di frutta .....	138
5.4	Risultati sperimentali dei test condotti sui prodotti succhi di frutta .....	141
5.4.1	Fluidi alimentari nelle bottiglie di PET da 500ml.....	142
5.4.2	Fluidi alimentari nelle bottiglie di PET da 750ml.....	144
5.4.3	Fluidi alimentari nelle bottiglie di PET da 1200ml.....	146

5.4.4	Fluidi alimentari nelle bottiglie di PET da 1500ml.....	147
5.5	Conclusioni ed Osservazioni .....	149
6	Conclusioni.....	155
6.1	Riepilogo.....	155
6.2	Risultati ottenuti.....	156
6.3	Sviluppi futuri .....	157
7	Bibliografia.....	161

# Abstract

Nel campo delle tecnologie alimentari, sempre di più le problematiche di scambio termico stanno evidenziandosi come una frontiera di studi e analisi in quanto poco o per niente considerate fino ad oggi.

In particolare, lo scambio termico tra sistemi di condizionamento degli alimenti (refrigerazione, essiccazione, pastorizzazione, abbattimento della temperatura) ed alimenti stessi presenta livelli di difficoltà molto elevati a causa delle proprietà dei materiali, della modalità di scambio termico e della presenza contemporanea di più fasi di processamento.

Uno dei settori a maggiore interesse è quello dei liquidi imbottigliati. Questi, al loro interno scambiano calore tramite il fenomeno della convezione naturale ma all'esterno scambiano calore tramite convezione forzata.

L'influenza sul processo di questi fenomeni viene condizionata dalla natura del fluido stesso che può presentare comportamento diverso se si dovesse trattare di fluidi con caratteristiche del tutto simili all'acqua, fluido dal comportamento noto in molte condizioni diverse, o di fluidi alimentari ottenuti come soluzioni acquose di polpe di frutti diversi.

Essendo nell'ambito alimentare, tutti i trattamenti devono rispettare le condizioni igienico sanitarie richieste dalle normative che richiedono anche la verifica sperimentale della realizzazione del trattamento termico come ad esempio la verifica delle unità di pastorizzazione dopo il trattamento di pastorizzazione in uno dei prodotti più consumati al mondo, la birra.

Il progetto intende affrontare le principali problematiche legate ai trattamenti di pastorizzazione degli alimenti tramite macchine a tunnel con strumenti analitici (VEM) e numerici (CFD) e con prove sperimentali condotte presso un laboratorio esterno all'Università degli Studi di Ferrara dove si svolge il corso del Dottorato. Il progetto, infatti, è il frutto della collaborazione tra l'università e una azienda leader mondiale nella produzione di macchina a tunnel per il trattamento termico di prodotti alimentari di nome Sidel che ha sede a Verona e che mette a disposizione i laboratori e tutta la conoscenza sviluppata e accumulata nel corso degli anni.

# Indice delle Figure

## Capitolo 1 Pastorizzazione e Raffreddamento

Figura 1.1 Primo esperimento di Pasteur sulla pastorizzazione .....	27
Figura 1.2 Pastorizzatore a piastre per il trattamento del latte .....	28
Figura 1.3 Pastorizzatore a piastre per il trattamento del vino .....	29
Figura 1.4 Cavitazione Ultrasonica .....	32
Figura 1.5 Diagramma schematico di un sistema a plasma.....	33
Figura 1.6 Esempio di circuito a CO <sub>2</sub> per il trattamento di prodotti alimentari .....	34
Figura 1.7 Schema di pastorizzatore a tunnel.....	37
Figura 1.8 Esempio di pastorizzazione single deck.....	38
Figura 1.9 Esempio di pastorizzazione double deck .....	39
Figura 1.10 Esempio di Redpost .....	40
Figura 1.11 Esempio di Cooler single deck.....	42

## Capitolo 2 Pastorizzazione e Raffreddamento: Modelli Numerici

Figura 2.1 Schema del contenitore cilindrico.....	47
Figura 2.2 Schema dello scambio di calore all'interno del contenitore cilindrico .....	48
Figura 2.3 Andamento di temperatura e velocità dello strato bilaminare a parete .....	49

Figura 2.4 Profili di temperatura in funzione della coordinata x nel film a y fissata e profili di y in funzione della coordinata x a T costante ( $T_1=5^{\circ}\text{C}$ e $\Delta T=20^{\circ}\text{C}$ ) .....	59
Figura 2.5 Suddivisione del volume in direzione assiale con n elementi con i relativi flussi .....	63
Figura 2.6 Storia termica del prodotto risultato del modello implementato in ambiente Matlab.....	63
Figura 2.7 Schema dell'andamento della temperatura in funzione degli strati attraversati	67
Figura 2.8 Rappresentazione del a) Volume fluido, e della mesh riportata su b) una sezione verticale e c) una sezione orizzontale .....	69
Figura 2.9 Storia termica del campione durante le simulazioni numerica nei tre punti di interesse (Cold Spot, Centro Geometrico e Punto Intermedio).....	71
Figura 2.10 Evoluzione termica del campione con le caratteristiche dell'acqua ogni 60 secondi.....	71
Figura 2.11 Streamline della velocità del fluido negli istanti di tempo indicati.....	72
Figura 2.12 Storia termica del campione con le caratteristiche del succo di frutta al gusto di mango durante le simulazioni numerica nei tre punti di interesse (Cold Spot, Centro Geometrico e Punto Intermedio) .....	74
Figura 2.13 Evoluzione termica del campione con le caratteristiche del succo di frutta al gusto di mango ogni 60 secondi .....	74
Figura 2.14 Confronto tra la storia termica del campione con le caratteristiche dell'acqua e l'evoluzione termica del campione con le caratteristiche del succo di frutta al gusto di mango .....	75
Figura 2.15 Confronto tra l'evoluzione termica del campione con le caratteristiche dell'acqua e l'evoluzione termica del campione con le caratteristiche del succo di frutta al gusto di mango ogni 60 secondi .....	76

### Capitolo 3 Banco Prova Sperimentale per ciclo di Pastorizzazione e Raffreddamento

Figura 3.1 Prodotti analizzati grazie al banco prova: birra in bottiglie di vetro e lattine, succhi di frutta con diversi frutti come base.....	78
Figura 3.2 Layout banco prova.....	80
Figura 3.3 Schema di partenza camera banco prova .....	81

Figura 3.4 Lattine (330ml 500ml) e bottiglie (330 ml 660 ml) all'interno della camera di prova.....	82
Figura 3.5 Resistenza da riscaldamento ad immersione.....	85
Figura 3.6 Giunto a manicotto o giunto Straub .....	86
Figura 3.7 a) Misuratore di portata elettromagnetico e b) funzionamento teorico.....	88
Figura 3.8 Regolazione portata nella camera di prova tramite valvola a saracinesca.....	89
Figura 3.9 Termometro compatto Easytemp TMR 31 .....	89
Figura 3.10 a) Portasonda con stelo e b) portasonda con inserto fissato con tappo originale della bottiglia tramite dado .....	92
Figura 3.11 Sonde di temperatura preparate per essere inserite nei campioni da sottoporre a test.....	92
Figura 3.12 Sonde fissate con i relativi porta sonda e inserite nei campioni di birra ed acqua da sottoporre al test .....	93
Figura 3.13 Sonde fissate con i relativi porta sonda ai tappi originali, inserite nei campioni di acqua e di succo da sottoporre al test, formati da 1 litro in vetro, da 1,5 litri e 0,5 litri in Hot Fill PET .....	93
Figura 3.14 Dettaglio della sonda di temperatura che rileva la temperatura a Cold Spot...	94
Figura 3.15 Termocoppie usate per misurare l'effettiva temperatura della doccia nella camera.....	95
Figura 3.16 Termocoppie usate per misurare l'effettiva temperatura della doccia nella camera inferiore.....	95
Figura 3.17 a) Schema costruttivo del sensore pressione e b) e c) sua installazione sulla parte esterna della camera di prova .....	96
Figura 3.18 a) Schema costruttivo del sensore pressione e b) sensore di pressione.....	97
Figura 3.19 Collettori con tubi porta ugelli intercambiabili all'interno delle camere di prova.....	99
Figura 3.20 Regolazione portata nella camera di prova tramite valvola a saracinesca.....	99
Figura 3.21 Ugelli a) a cono vuoto e b) a cono pieno e c) loro curve caratteristiche messe a confronto.....	101
Figura 3.22 Interfaccia HMI touch screen del PLC che gestisce il banco prova .....	103
Figura 3.23 Interfaccia HMI touch screen del PLC che riporta la storia termica registrata dalle sonde poste all'interno della camera di prova .....	104
Figura 3.24 Valvole idrauliche installate nel circuito e attivate dal PLC tramite attivazione pneumatica: a) valvola a farfalla; b) valvola a pistone.....	106

Figura 3.25 a) Taratura termocoppie tramite fornetto di prova, b) dettaglio sulle sonde inserite nel fornetto di prova.....	107
---	-----

#### Capitolo 4 Analisi sperimentale dei processi di pastorizzazione per il prodotto birra

Figura 4.1 Schema del “quadrato”, definito dalla linea tratteggiata, formato da quattro ugelli e posizioni caratteristiche in cui vengono posti i campioni nel piano della camera di prova.....	113
Figura 4.2 Raffigurazione delle altezze: altezza della bottiglia ( $h_b$ ), altezza del tappo portasonda ( $h_{ps}$ ) e altezza totale ( $H_{tot}$ ) .....	115
Figura 4.3 Schermata principale con la ricetta del test del riscaldamento del prodotto ....	120
Figura 4.4 Bottiglie in vetro da 330 ml di birra analizzate con test a diverse portate di acqua per le docce di trattamento termico .....	121
Figura 4.5 Trend della $DT_t$ in funzione della $Q_{spec}$ per i tre campioni di bottiglie in vetro da 330 ml di birra nelle 3 posizioni caratteristiche al piano superiore e al piano inferiore ...	122
Figura 4.6 Bottiglie in vetro da 660 ml di birra analizzate con test a diverse portate di acqua per le docce di trattamento termico .....	123
Figura 4.7 Trend della $DT_t$ in funzione della $Q_{spec}$ per i tre campioni di bottiglie in vetro da 660 ml di birra nelle 3 posizioni caratteristiche al piano superiore e al piano inferiore ...	124
Figura 4.8 Lattine in alluminio da 330 ml di birra analizzate con test a diverse portate di acqua per le docce di trattamento termico .....	125
Figura 4.9 Trend della $DT_t$ in funzione della $Q_{spec}$ per i tre campioni di lattine in alluminio da 330 ml di birra nelle 3 posizioni caratteristiche al piano superiore e al piano inferiore .....	126
Figura 4.10 Lattine in alluminio da 500 ml di birra analizzate con test a diverse portate di acqua per le docce di trattamento termico .....	127
Figura 4.11 Trend della $DT_t$ in funzione della $Q_{spec}$ per i tre campioni di lattine in alluminio da 500 ml di birra nelle 3 posizioni caratteristiche al piano superiore e al piano inferiore .....	128

## Capitolo 5 Analisi sperimentale dei processi di pastorizzazione per i prodotti del gruppo succhi di frutta

Figura 5.1 Schema dei “quattro quadrati”, definiti dalla linea tratteggiata, formati da quattro ugelli e posizioni in cui vengono posti i campioni di succo e quello contenente acqua nel piano superiore della camera di prova.....	135
Figura 5.2 Bottiglie in PET utilizzate durante i test .....	136
Figura 5.3 Strumenti utilizzati durante i test presso il laboratorio in azienda a) bilancia e bicchiere graduato; b) rifrattometro ottico.....	137
Figura 5.4 Reometro dell’università degli Studi di Ferrara utilizzato per la definizione della viscosità dinamica in funzione della velocità di taglio.....	138
Figura 5.5 Fasi di preparazione dei campioni dei succhi di frutta: a) riscaldamento, b) misura della temperatura del fluido alimentare, c) imbottigliamento .....	139
Figura 5.6 a) Posizionamento delle sonde nei campioni e b) dei campioni sul piano della camera di prova .....	139
Figura 5.7 Schermata principale con la ricetta del test del raffreddamento del prodotto..	141
Figura 5.8 Campioni di fluidi alimentari e corrispettivo di acqua nel formato PET 500 ml a) appena inseriti nella camera di prova e b) durante una fase del test di abbattimento multiplo.....	143
Figura 5.9 Campioni di fluidi alimentari e corrispettivo di acqua nel formato PET 750 ml a) appena inseriti nella camera di prova e b) durante una fase del test di abbattimento multiplo.....	145
Figura 5.10 Campioni di fluidi alimentari e corrispettivo di acqua nel formato PET 1200 ml a) appena inseriti nella camera di prova e b) durante una fase del test di abbattimento multiplo.....	146
Figura 5.11 Campioni di fluidi alimentari e corrispettivo di acqua nel formato PET 1500 ml a) appena inseriti nella camera di prova e b) durante una fase del test di abbattimento multiplo.....	148
Figura 5.12 Evoluzione termica attraverso i quattro abbattimenti di temperatura consecutivi a) del campione da 1500ml contenente acqua e b) del campion da 1500ml contenete arancia rossa .....	149
Figura 5.13 Evoluzione termica attraverso i quattro abbattimenti di temperatura consecutivi a) del campione da 1500ml contenente acqua e b) del campion da 1500ml contenete mango .....	150

Figura 5.14 Evoluzione termica attraverso i quattro abbattimenti di temperatura consecutivi a) del campione da 1500ml contenente acqua e b) del campion da 1500ml contenete pera .....	150
Figura 5.15 Istogramma che riporta e mette a confronto il rapporto tra i valori della $DT_t$ dei vari fluidi alimentari e quello dell'acqua al centro geometrico per il formato PET da 1500ml per i quattro abbattimenti consecutivi .....	151
Figura 5.16 Relazione tra la percentuale di polpa dei vari succhi e il rapporto tra i valori della $DT_t$ dei vari fluidi alimentari e quello dell'acqua al centro geometrico per il formato PET da 1500ml per i quattro abbattimenti consecutivi .....	152
Figura 5.17 Relazione tra la percentuale di polpa dei vari succhi e il rapporto tra i valori della $DT_t$ dei vari fluidi alimentari e quello dell'acqua al centro geometrico per il formato PET da 1200ml per i quattro abbattimenti consecutivi .....	153
Figura 5.18 Relazione tra la percentuale di polpa dei vari succhi e il rapporto tra i valori della $DT_t$ dei vari fluidi alimentari e quello dell'acqua al centro geometrico per il formato PET da 750ml per i quattro abbattimenti consecutivi .....	154
Figura 5.19 Relazione tra la percentuale di polpa dei vari succhi e il rapporto tra i valori della $DT_t$ dei vari fluidi alimentari e quello dell'acqua al centro geometrico per il formato PET da 500ml per i quattro abbattimenti consecutivi .....	154

## Capitolo 6 Conclusioni

Figura 6.1 Evoluzione termica attraverso tutte le fasi di un intero ciclo di pastorizzazione di un campione in vetro del volume da 1000ml contenente acqua.....	158
--	-----

# Indice delle Tabele

## Capitolo 2 Pastorizzazione e Raffreddamento: Modelli Numerici

Tabella 2.1 Ordini di grandezza delle caratteristiche del getto bilaminare .....	56
Tabella 2.2 Variazione con “y” delle caratteristiche del getto bilaminare .....	57
Tabella 2.3 Valori delle grandezze caratterizzanti il getto in funzione di “y” .....	58

## Capitolo 3 Banco Prova Sperimentale per ciclo di Pastorizzazione e Raffreddamento

Tabella 3.1 Serie di calcoli per il dimensionamento dell’impianto idrico del banco prova	83
--	----

## Capitolo 5 Analisi sperimentale dei processi di pastorizzazione per i prodotti del gruppo succhi di frutta

Tabella 5.1 Tabella con tutti i fluidi alimentari testati e le loro caratteristiche fisiche .....	142
Tabella 5.2 Rapporti tra i valori della $DT_t$ dei vari fluidi alimentari e quello dell’acqua al centro geometrico per il formato PET da 500ml per i quattro abbattimenti consecutivi ..	144
Tabella 5.3 Rapporti tra i valori della $DT_t$ dei vari fluidi alimentari e quello dell’acqua al centro geometrico per il formato PET da 750ml per i quattro abbattimenti consecutivi ..	145

Tabella 5.4 Rapporti tra i valori della  $DT_t$  dei vari fluidi alimentari e quello dell'acqua al centro geometrico per il formato PET da 1200ml per i quattro abbattimenti consecutivi 147

Tabella 5.5 Rapporti tra i valori della  $DT_t$  dei vari fluidi alimentari e quello dell'acqua al centro geometrico per il formato PET da 1500ml per i quattro abbattimenti consecutivi 148

# Obiettivo della Tesi

La necessità di poter rendere più efficienti dal punto di vista energetico e più versatili per diversi settori industriali le macchine a tunnel per trattamenti termici di prodotti alimentari è il tema principale di questo lavoro.

L'obiettivo di questa tesi è quello di aumentare la conoscenza dei fenomeni che si verificano durante i cicli di trattamento termico all'interno delle macchine a tunnel per lavorazioni industriali di prodotti alimentari.

In base a tale obiettivo, questo lavoro si è sviluppato seguendo vari punti:

- definizione e inizializzazione di metodi di analisi numerica per il fenomeno di scambio di calore all'interno di macchine a tunnel per trattamenti termici di pastorizzazione o raffreddamento
- progettazione e realizzazione di un banco prova per l'esecuzione di una serie di test sperimentali su differenti prodotti alimentari per la raccolta dati
- analisi dell'influenza delle variabili controllabili da operatori esterni sull'efficienza delle prestazioni delle macchine a tunnel per trattamenti termici di pastorizzazione o raffreddamento
- verifica sperimentale e numerica dei fenomeni di scambio termico all'interno di prodotti alimentari con diverse caratteristiche fisiche
- generalizzazione dei risultati ottenuti e definizione di nuove linee guida per la costruzione di macchine a tunnel per trattamenti termici di pastorizzazione o raffreddamento di prodotti alimentari



# Originalità e Contributi degli Altri

In questo lavoro l'analisi numerica che caratterizza lo scambio di calore tra diversi fluidi in ambienti isolati è legata all'approccio sperimentale che ha permesso, con l'esecuzione di una serie di attività di laboratorio mirate, la raccolta di numerosi dati con l'obiettivo di aumentare la conoscenza dei fenomeni che si verificano durante i cicli di trattamento termico all'interno delle macchine a tunnel industriali per la lavorazione di prodotti alimentari.

Molte persone hanno contribuito a realizzare le attività di laboratorio e a sviluppare la ricerca numerica e le seguenti righe delineano il loro contributo.

Il Professor Michele Pinelli ha permesso di instaurare una collaborazione tra l'Università degli Studi di Ferrara e una delle aziende leader mondiale nella realizzazione di applicazioni industriali di macchine per trattamenti termici a tunnel, ovvero Sidel. Il suggerimento iniziale, cioè quello di portare avanti in simbiosi l'analisi numerica e le attività sperimentali di laboratorio, è stato il contributo iniziale che ha permesso lo sviluppo delle attività raccolte in questa tesi e che hanno caratterizzato gli anni dell'attività di dottorato

L'Ingegnere Luca Fiorio, amministratore delegato, e l'Ingegnere Michele Composta, responsabile del settore di Ricerca e Sviluppo, dell'azienda Sidel con sede a Verona hanno contribuito a rendere saldo il rapporto tra l'azienda stessa e l'Università. Inoltre, mettendo a disposizione le risorse e le conoscenze pluridecennali della azienda permesso di realizzare il banco prova fondamentale per l'analisi sperimentale del problema permettendo di svolgere le numerose attività sperimentali presso il laboratorio dell'azienda stessa.

Il Dottor Alessio Suman ha suggerito, tra le numerose attività svolte, le condizioni al contorno per le varie analisi numeriche e ha tracciato le linee guida per le attività sperimentali in modo da poter esplorare in modo ottimale le condizioni di lavoro a cui sono sottoposti i prodotti alimentari durante il ciclo di lavorazione ed essere poi in grado di ottenere risultati significativi per questo tipo di ricerca.

Un ringraziamento particolare va a tutto il gruppo di Macchine e Sistemi Energetici dell'Università degli studi di Ferrara che mi ha permesso di portare avanti il progetto dandomi lo spazio e il tempo per sviluppare le idee. In particolar modo ringrazio Dottor Nicola Aldi che per anni mi ha consigliato e mi ha guidato nello sviluppo dei modelli numerici. Un sentito ringraziamento anche al mio collega di Ufficio nonché dottorando lui stesso Saverio Randi che mi ha sempre aiutato e guidato nelle decisioni importanti durante il percorso degli studi legati al dottorato.

# Capitolo 1

## Pastorizzazione e Raffreddamento

### 1.1 Pastorizzazione: processo termico

Una dei più utilizzati ed efficaci metodi per prolungare la vita delle bevande imbottigliate è il processo termico che prende il nome di pastorizzazione. Si tratta di un processo termico che ha come scopo quello di minimizzare i rischi per la salute dovuti a microorganismi patogeni sensibili al calore (come possono essere funghi e lieviti che si presentano come batteri in forma vegetativa) con una alterazione minima delle caratteristiche chimiche, fisiche ed organolettiche dell'alimento. Il procedimento consiste nel portare rapidamente alimenti liquidi o semiliquidi a temperatura compresa fra i 60°C (pastorizzazione bassa) e gli 80 °C (pastorizzazione alta) per tempi di durata variabile tra i 30 minuti e i 15 secondi. Tanto più è breve il processo quanto più alta è la temperatura. Con questa tecnica si mira a distruggere tutti i microorganismi patogeni presenti nell'alimento e una parte di quella microflora saprofitica che può causare alterazioni di varia natura. I prodotti pastorizzati, se isolati dall'ambiente esterno in modo da evitare un nuovo inquinamento, hanno una durata di conservazione molto maggiore di quella dei corrispondenti prodotti non trattati.

La pastorizzazione trae il nome da quello di Louis Pasteur e ha la sua origine da una serie di ricerche che lo stesso condusse sulle cause che minacciavano di portare alla rovina le grandi industrie francesi della birra e del vino a causa dell'acidificazione e dell'alterazione. Queste ultime, secondo gli studi di Pasteur, potevano essere evitate bollendo il vino o la birra e imbottigliandolo poi in contenitori a chiusura ermetica. In questo

modo si distruggeva la microflora nel prodotto e s'impediva ai microrganismi dell'ambiente di venire a contatto con la bevanda risanata.

I trattamenti con il calore si sono quindi rivelati utili per eliminare i microrganismi mesofili che minacciano la salute dell'uomo. Infatti, una delle prime applicazioni in questo campo risale alla fine del XIX secolo quando si incominciò a pastorizzare il latte per eliminare l'agente della tubercolosi umana. Successivamente sono stati sviluppati altri trattamenti termici di questo tipo, miranti a prevenire malattie derivanti da cibo contaminato da altri microrganismi patogeni.

La pastorizzazione viene scelta come processo termico per trattare un alimento nel caso in cui un trattamento più rigoroso può danneggiare la qualità del prodotto, quando l'obiettivo principale è distruggere determinati microrganismi patogeni e questi non sono resistenti al calore oppure quando si desidera ridurre la carica microbica tanto da permettere a un certo microrganismo di portare avanti la fermentazione voluta (per esempio nella fabbricazione dei formaggi).

Per quanto riguarda il processo di pastorizzazione della birra, una delle bevande più diffuse e consumate nel mondo, viene praticata nel terzo stadio della sua produzione ovvero dopo l'ammontamento del malto e la fermentazione. Il trattamento si rende necessario per stabilizzare e conservare il prodotto. Infatti, in esso vi sono presenti ancora cellule di lievito in grado di moltiplicarsi molto velocemente e inoltre il modesto tenore alcolico non è in grado di bloccare lo sviluppo di microrganismi indesiderati. La birra filtrata viene imbottigliata sotto pressione e tappata automaticamente con tappi a corona sterilizzati. Le bottiglie sono poi avviate ai pastorizzatori nei quali ha luogo la pastorizzazione con acqua calda a pioggia. Il trattamento dura dai 45 ai 50 minuti portando le bottiglie e il loro contenuto al di sopra dei 60 °C. Successivamente vengono raffreddate fino alla temperatura ambiente. Affinché la pastorizzazione abbia successo occorre che la temperatura dell'acqua usata per la pioggia aumenti e diminuisca gradualmente poiché gli sbalzi di temperatura possono causare la rottura delle bottiglie stesse. Inoltre, deve essere garantita la temperatura massima e deve essere scrupolosamente garantito il mantenimento per il tempo necessario in questa determinata condizione. Un'altra condizione necessaria, che deve essere verificata affinché il trattamento termico sia efficace, è che i tappi e le bottiglie, le quali devono essere robuste per contenere l'aumento della pressione interna, siano a perfetta tenuta. Un buon processo di pastorizzazione ben eseguito permette di prolungare il tempo di conservazione

della birra, che normalmente a temperatura ambiente non supererebbe i 20 gironi, fino a più di 3 mesi.

L'efficacia della pastorizzazione viene valutata in termini di Unità di Pastorizzazione (UP). Una UP è definita come l'effetto che si ottiene in un minuto di riscaldamento a 60°C. Gli studi di Del Vecchio e altri (Del Vecchio , Dayharsh, & Baselt , 1951) sugli organismi di deterioramento della birra costituiscono la base della definizione sopraripotata la quale può essere espressa con la formula (1-1).

$$UP = t * 10^{\frac{T-T_{ref}}{Z}} \quad (1-1)$$

oppure, usando un rapporto, può essere espressa con la formula (1-2)

$$\frac{d UP}{dt} = 10^{\frac{T-T_{ref}}{Z}} \quad (1-2)$$

dove

- $T_{ref} = 60 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- $Z = 6.94 \text{ K}$ .

Le UP sono di solito calcolate usando la temperatura in un punto di riferimento. Per questo motivo il punto di riferimento in cui viene fatta la misura della variabile di controllo deve essere lo stesso sia in fase di progettazione che durante la fase di lavorazione del prodotto che attraversa i vari trattamenti che si concatenano lungo l'impianto. Per quanto riguarda la birra, la temperatura viene misurata in corrispondenza del Cold Spot. Come indicato nel lavoro brevettato di Clyne ed altri (Clyne , Wooler, Teng, & Naji, 1989) si tratta del punto a distanza pari a un quarto di pollice (0.635 cm) dal centro del fondo della bottiglia o della lattina che contiene il fluido. Viene definito Cold Spot poiché si tratta del punto all'interno del contenitore che impiega il maggior tempo per scaldarsi perciò sarà sempre il punto alla più bassa temperatura del fluido. Ciò è dovuto alla dinamica interna di scambio termico che avviene per convezione naturale dentro i vari contenitori. Si generano infatti delle celle convettive che trasmettono tra loro calore per convezione naturale. Dato che il processo di pastorizzazione del fluido deve essere garantito per tutto il contenuto della bottiglia e dato che la verifica di tale processo viene fatto sulla base della UP (calcolate in funzione della temperatura come evidenziato dalla formula (1-1) si progetta il processo in

vantaggio di sicurezza considerando cioè le condizioni misurate nel punto più sfavorito del processo. Nel caso di fluidi con caratteristiche fisiche diverse (densità, viscosità, grado brix, percentuale di polpa, etc) il punto di riferimento da considerare per le analisi di temperatura si sposta al centro geometrico del contenitore, come evidenziato negli studi di Derossi e altri (Derossi, De Pilli, La Penna, & Sevrini, 2012). Ciò è dovuto alla variazione del processo di scambio termico, infatti, con il variare delle caratteristiche fisiche del fluido il processo può diventare sempre più di natura conduttiva.

Il valore delle UP viene utilizzato come valore di verifica per valutare l'efficacia del processo di pastorizzazione realizzato sul fluido voluto. Per quanto riguarda la birra, però, devono essere considerati anche altri parametri fisici che permettono di definire corretto il processo termico post imbottigliamento. Infatti, per ottenere un determinato valore di UP si possono utilizzare diverse combinazioni delle due variabili temperatura e tempo. Maggiore è la temperatura a cui si può far avvenire il processo termico e minore deve essere il tempo a cui mantenere il prodotto. Viceversa, minore sarà la temperatura a cui avviene il processo di pastorizzazione (comunque superiore ai 60 gradi) e maggiore sarà l'intervallo di tempo necessario per far avvenire in maniera efficace il processo termico. Usando una temperatura compresa tra i 60°C e i 65°C per un intervallo di tempo di 30 minuti si può ottenere una pastorizzazione definita bassa ed è impiegata nel trattamento di alimenti delicati quali vino e birra. Usando una temperatura compresa tra i 75°C e gli 85°C per un intervallo di tempo di 2 o 3 minuti si può ottenere una pastorizzazione definita alta. Usando una temperatura compresa tra i 75°C e gli 85°C per un intervallo di tempo di 15 o 20 secondi si può ottenere una pastorizzazione definita rapida o HTST (High Temperature Short Time). Per la scelta della giusta combinazione di temperatura e tempo per un prodotto come la birra vanno considerati inoltre gli effetti delle due variabili anche su caratteristiche fisiche come il colore e l'aroma del prodotto dopo il processo. Questo tipo di cautela va osservata dato che il prodotto va in commercio nella grande distribuzione e deve rispettare quindi l'aspetto e i gusti ben definiti del prodotto che viene commercializzato. Utilizzando infatti temperature troppo elevate per il processo termico di pastorizzazione si potrebbe correre il rischio di ossidare la birra facendo cambiare le caratteristiche visive e organolettiche.

## **1.2 Tecniche di pastorizzazione**

Le tecniche per eseguire una corretta pastorizzazione sui vari prodotti hanno subito una grande evoluzione fino ad arrivare alle moderne applicazioni per gli elevati volumi che devono essere sottoposti al trattamento termico in campo industriale.

Durante il primo esperimento per la dimostrazione dell'efficacia del trattamento termico, illustrato in Figura 1.1, Pasteur utilizzò un pallone di vetro con il collo lungo piegato ad S in modo da consentire l'ingresso dell'aria ma impedire la contaminazione del contenuto da parte della polvere e dei batteri in essa presenti. All'interno del recipiente venne messo del brodo. Successivamente lo fece bollire in modo da uccidere tutti i microorganismi eventualmente presenti nel brodo e nel collo del recipiente. Dopo averlo lasciato raffreddare il tutto, Pasteur si rese conto che il brodo non aveva generato batteri. In questo modo diede una riposta scientifica negativa alla generazione spontanea dei microorganismi, argomento molto dibattuto ai suoi tempi, dimostrando quindi che quest'ultimi provengono dalla polvere. In seguito, sulla base del suo esperimento diede anche un metodo per eseguire la pastorizzazione. Questo prevede quindi un riscaldamento del prodotto sopra una determinata temperatura seguito da un rapido raffreddamento.

Dopo questo primo rudimentale esperimento la procedura è stata ottimizzata e resa più efficace per volumi di fluidi maggiori. Inoltre, la maggior parte dei processi sono stati ottimizzati per la pastorizzazione di alimenti di natura fluida.



**Figura 1.1 Primo esperimento di Pasteur sulla pastorizzazione**

Una delle prime applicazioni, infatti, risale al XIX secolo quando si incominciò a pastorizzare il latte per eliminare l'agente della tubercolosi umana. Per la pastorizzazione del latte sono stati quindi sviluppati due tipi di pastorizzatori: una a temperatura non molto alta (63°C circa) per un tempo relativamente lungo (20-30 minuti) e una a temperatura più

alta (75°C circa) per qualche decina di secondi. Il primo tipo viene realizzato con scambiatori di calore cilindrici o conici (tini) sia ad asse orizzontale sia ad asse verticale a doppia parete, formante intercapedine nella quale circola il vapore di surriscaldamento. Il latte, riscaldato in questi scambiatori, viene poi fatto sostare per il tempo necessario in vasche tenute a temperatura costante. Gli impianti a funzionamento rapido sono costituiti essenzialmente da: uno scambiatore di calore a piastre, vedi Figura 1.2, che permette il riscaldamento di un velo sottile di latte (di qualche millimetro di spessore) con la circolazione di un secondo fluido caldo; un tubo sostatore continuo di lunghezza tale da consentire al latte di rimanere alla temperatura di pastorizzazione il tempo necessario; dei serbatoi termostatici di stoccaggio; varie pompe per la circolazione del latte e per la circolazione del fluido; un refrigeratore, nel quale il latte acquista la temperatura finale per la conservazione (3-5°C).



**Figura 1.2** Pastorizzatore a piastre per il trattamento del latte

Anche per il vino e per le altre bevande alimentati si adoperano pastorizzatori a piastra, Figura 1.3, simili a quelli usati per il latte. La pastorizzazione si effettua spesso però anche nel prodotto già imbottigliato, come per la birra, e in questo caso sono usati pastorizzatori continui, costituiti da camere chiuse entro le quali le bottiglie sono fatte avanzare a mezzo di nastri trasportatori e riscaldate gradualmente con acqua fatta cadere sotto forma di pioggia dall'alto. Il trattamento può durare dai 45 ai 50 minuti con una

temperatura di pastorizzazione superiore ai 60 °c per un intervallo di tempo all'incirca di 12 o 15 minuti. Nella fase finale le bottiglie vengono raffreddate e riportate alla temperatura ambiente (20-25 °C). Affinché la pastorizzazione abbia successo occorre che la temperatura dell'acqua aumenti e diminuisca in modo graduale, che la temperatura massima sia scrupolosamente mantenuta e che i tappi e le bottiglie siano a perfetta tenuta. Nel caso si verificano degli sbalzi di temperatura, infatti, si possono verificare delle rotture delle bottiglie anche se sono sufficientemente robuste, sia che siano realizzate con il vetro che con l'alluminio che con il PET, per contenere l'aumento della pressione interna. Una pastorizzazione ben eseguita permette di prolungare la conservazione della birra, che normalmente a temperatura ambiente non supererebbe i 20 giorni, sino a 3 mesi e più.



**Figura 1.3** Pastorizzatore a piastre per il trattamento del vino

In campo alimentare, la pastorizzazione viene praticata anche su omogeneizzati di frutta e verdura o di carne, prima dell'inscatolamento. Si tratta di una pastorizzazione rapida o pastorizzazione lampo (a 120-140 °C per tempi variabili da frazioni di secondo a qualche secondo), che raggiunge lo scopo di abbassare notevolmente la popolazione microbica, senza

danneggiare apprezzabilmente i componenti termolabili dei prodotti, questo tipo di trattamento termico viene ben descritto nel lavoro di Zufall e Wackerbauer (Zufall & Wackerbauer, 2012). Le caratteristiche di tal processo, che garantisce una buona stabilità dell'omogeneizzato per tempi sufficientemente lunghi, sono però tali da farlo classificare più come sterilizzazione lampo che non come vera e propria pastorizzazione.

Dati gli elevati numeri che riguardano la produzione di questi prodotti, si parla di circa 700 milioni di litri all'anno nel mondo di latte e di circa 200 miliardi di litri di birra all'anno nel mondo, dati raccolti dalla FAO e proposti sul loro sito (FAO), le tecnologie legate alla pastorizzazione dei prodotti sopraelencati hanno subito un notevole sviluppo soprattutto per quanto riguarda la configurazione per le applicazioni industriali. Dato che devono essere inserite in una catena di produzione, la pastorizzazione è l'ultima fase della lavorazione, è stato scelto di realizzarla con macchine dinamiche che, grazie a grandi nastri trasportatori, sottopongono a trattamento termico gli elevati volumi prodotti. Un esempio concreto sono le macchine a tunnel, utilizzate per la pastorizzazione della birra. I volumi di produzione oraria si aggirano tra i 700 mila litri ora.

Ovviamente le tecnologie classiche hanno pro e contro, infatti comportano elevati consumi di energia elettrica e di acqua, la quale, in certi luoghi del pianeta, non è una risorsa così comune o così a basso costo. Perciò le ricerche e gli sviluppi di tale settore esplorano sempre altri settori e altre tecnologie.

Sempre più di frequentemente vengono utilizzati gli ultrasuoni anche nelle applicazioni industriali per realizzare processi di congelamento, di taglio, di essiccazione, di omogeneizzazione, di degasatura, di riduzione della formazione di schiuma, di filtrazione e di estrazione. Vengono usati sia in alternativa alle tecniche tradizionali sia affiancandole e potenziandole. I vantaggi più evidenti sono:

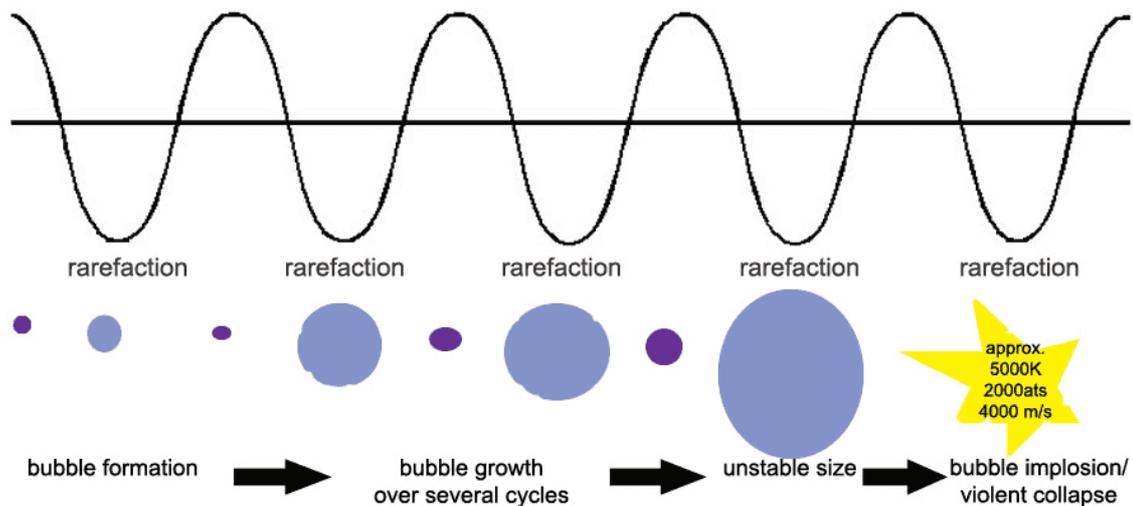
- il miglioramento delle miscele
- l'incremento del trasferimento di massa
- la riduzione delle temperature applicate al processo
- la riduzione dei consumi energetici
- l'incremento della produttività

Dato che permettono di non degradare le caratteristiche nutrizionali dell'alimento e che limitano i cambiamenti chimici, fisici ed organolettici che comportano i trattamenti

termici classici, gli ultrasuoni trovano una applicazione diffusa come spiegato nel libro di testo di Singh e Heldman dal titolo *Introduction to food Engineering*, (Singh & Heldman, 2001). Sono spesso abbinati ad altri fattori come la pressione e la temperatura o una loro combinazioni per poter rendere il processo più efficiente ed efficace. Ad esempio, l'ultrasonificazione è l'applicazione di ultrasuoni a bassa temperatura ed è utilizzata per prodotti termosensibili. Con questa tecnologia, l'inattivazione di enzimi e microorganismi richiede tempi relativamente lunghi con conseguente elevato consumo energetico e necessità di costante controllo della temperatura che tende autonomamente ad aumentare durante il trattamento con ultrasuoni. La termosonicazione, invece, combina ultrasuoni e calore ottenendo una efficacia maggiore rispetto al solo trattamento termico e consente di applicare temperature e tempi di pastorizzazione o di sterilizzazione inferiori. La manosonicazione combina ultrasuoni e pressione permettendo di lavorare a bassa temperatura ed è più efficace rispetto all'applicazione di soli ultrasuoni alla medesima temperatura. La manotermosonicazione combina pressione, temperatura ed ultrasuoni. Attiva enzimi e microorganismi termoresistenti lavorando a temperature inferiori al consueto o per tempi inferiori a parità di temperatura. I due fattori combinati, temperatura e pressione, favoriscono la cavitazione e aumentano l'efficacia del processo. Riescono quindi ad inattivare anche microrganismi che hanno una elevata termotolleranza ed alcuni enzimi termoresistenti (per esempio la lipossigenasi, la perossidasi, la polifenolossidasi) nonché le lipasi termosensibili ed alcune proteasi dello *Pseudomonas*. La cavitazione ultrasonica è un fenomeno che descrive la formazione, la crescita e il collasso implosivo di cavità (bolle) in un liquido. Questo processo viene illustrato, descritto e spiegato nella Figura 1.4. L'implosione delle bolle crea condizioni locali estreme (una temperatura che si aggira attorno ai 5000 K e una pressione locale di circa 2000 atm) con alte forze di taglio e turbolenze che forniscono l'energia necessaria per far avvenire il processo voluto. Negli articoli di Sargolzaei e altri (Sargolzaei, Mosavian, & Hassani, 2011) e di Suslick e Flannigan (Suslick & Flannigan, 2008) sono riportati i dettagli delle procedure descritte.

Oltre al calore, ci sono altri fenomeni fisici in grado di danneggiare irreversibilmente le cellule microbiche, tra cui l'elevata pressione: la tecnologia HPP (high pressure processing) è atta a stabilizzare microbiologicamente gli alimenti sia solidi che liquidi. Si utilizzano pressioni fino anche a 6000 atmosfere per ottenere la distruzione dei microorganismi e modifiche favorevoli della texture dell'alimento, che mantiene al contempo tutte le sue caratteristiche nutrizionali ed organolettiche grazie all'assenza di degradazione termica. L'alimento risulterà così avere un odore e un sapore più "freschi"

rispetto allo stesso alimento sottoposto a pastorizzazione termica. Tale tecnologia è già abbastanza diffusa in USA, Giappone e Australia ma molto meno in Europa.



**Figura 1.4 Cavitazione Ultrasonica**

Nel caso di alimenti liquidi (prodotti lattiero-caseari, succhi e polpe di frutta, passata di pomodoro o passati di altri vegetali, salse quali guacamole etc.) l'effetto delle alte pressioni è ottimale e provoca a volte anche miglioramento qualitativo della texture del prodotto. Nel caso di alimenti solidi il lotto di prodotto, confezionato in packaging flessibile (quasi sempre plastico, non necessariamente sottovuoto), è caricato nella camera ad alta pressione; questa viene poi riempita con un fluido idraulico (generalmente acqua) in grado di trasmettere la pressione, che viene applicata per alcuni minuti. La sua distribuzione uniforme al prodotto permette di evitare deformazioni: si possono trattare anche alimenti delicati quali ostriche e salumi già affettati. Al momento il trattamento HPP di alimenti confezionati è un processo discontinuo, ma il trattamento in linea è già in via di sviluppo. Tra le limitazioni della tecnologia HPP, vi è la non efficacia nei confronti delle spore batteriche che possono essere distrutte soltanto con trattamenti termici spinti. I trattamenti HPP risultano inoltre inadeguati nel caso di alimenti secchi, poiché non contengono sufficiente umidità che faccia da mezzo di trasmissione per le altre pressioni. Anche gli alimenti spugnosi (quali prodotti da forno, fragole, marshmallow etc) non possono essere trattati con HPP, poiché collasserebbero a causa della elevata pressione applicata. Esistono centri dedicati in cui le aziende alimentari possono sperimentare l'efficacia dell'alta pressione sul loro alimento in base al tipo di confezionamento scelto al packaging design,

con relativi studi di shelf life. Infine, un vantaggio della tecnologia HPP potrebbe essere rappresentato dalla percezione favorevole che pare riscuotere presso i consumatori poiché permette di prolungare la shelf life del prodotto senza utilizzo di trattamenti termici né di conservanti.

Un altro trattamento fisico che non prevede l'utilizzo né del calore né delle alte pressioni è la tecnologia CAPP (Cold Atmospheric Pressure Plasma), altre volte indicata più semplicemente con l'acronimo APP. Il plasma è, in questo caso, un gas ionizzato che è generato applicando un campo elettrico ad un gas inizialmente neutro. Tale plasma è fonte di vari agenti dotati di potere antimicrobico tra cui raggi UV, particelle cariche e specie reattive dell'ossigeno quali radicali superossido e idrossilico, che nel complesso sono efficaci nell'inattivare varie specie batteriche e virus presenti su vari substrati. Il potere del plasma resta confinato allo strato superficiale dell'alimento. Questa tecnologia trova applicazione nel campo, ad esempio, delle mandorle, Figura 1.5, che devono subire un trattamento superficiale per ridurre la presenza di organismi patogeni. Le tecnologie standard applicate a questo caso specificano presentavo inconvenienti come residui chimici pericolosi, danni dovuto al calore al sapore o alle caratteristiche organolettiche in generale, come descritto e spiegato negli articoli di Deng e altri (Deng, et al., 2007) e Khalili e altri (Khalili, et al., 2018)

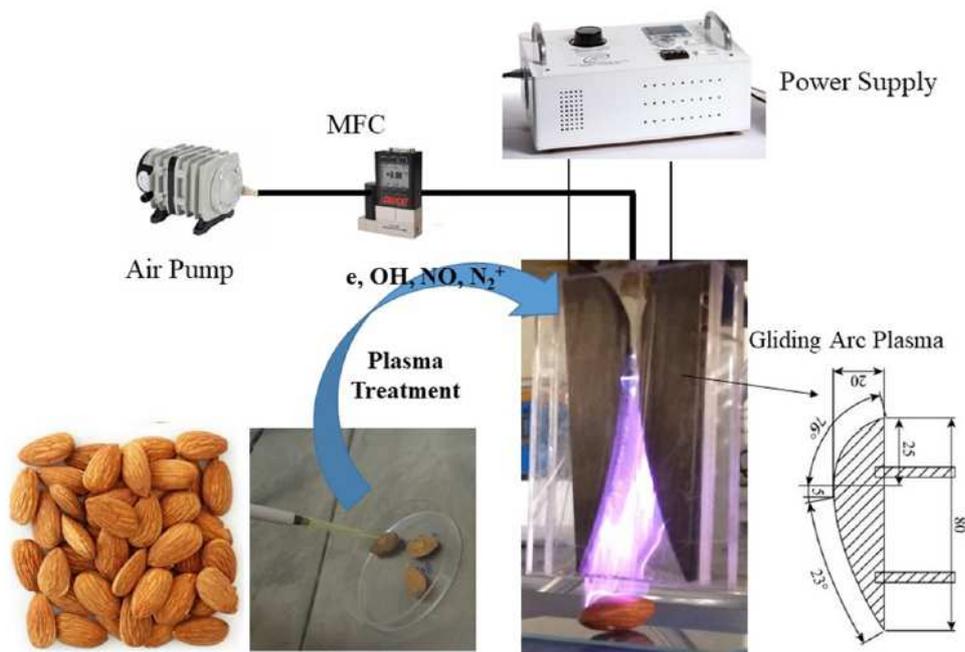
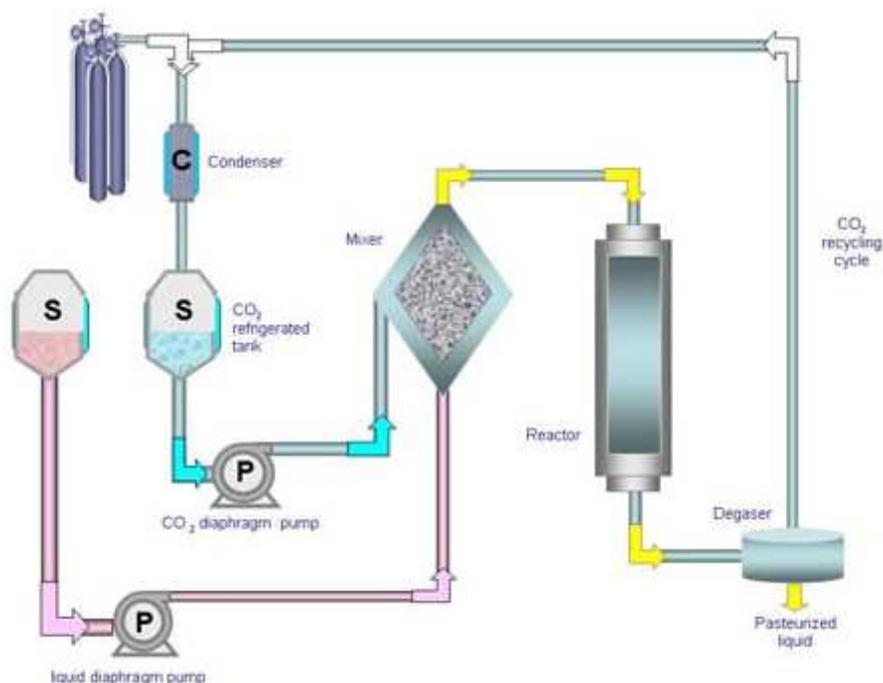


Figura 1.5 Diagramma schematico di un sistema a plasma

Oltre all'utilizzo di campi elettrici pulsati, ultrasuoni, microonde e pressione idrostatica è stato sperimentato l'uso di fluidi allo stato supercritico come opportunità di alternativa ai classici trattamenti termici di pastorizzazione. L'applicazione per uno sviluppo futuro su scala industriale sembra essere una delle migliori opportunità. Già dal 1987 l'anidride carbonica allo stato supercritico (pressione e temperatura sopra al valore critico, 73 bar e 31°C) è stata utilizzata come agente battericida. In particolare, fu dimostrata la sua efficacia nell'abbattimento di diversi tipi di batteri e di lieviti in soluzione acquosa. Molti altri studi hanno confermato l'efficienza del processo applicato a diversi prodotti liquidi (succhi di frutta, birra, latte, etc) garantendo un elevato tenore di sicurezza e non penalizzando i più importanti fattori chimico-fisici che determinano la qualità dei prodotti stessi. L'applicazione principale per questo tipo di tecnologia riguarda prodotti a base di carne (affettati come il prosciutto cotto) che possono subire contaminazioni microbiologiche. Questa è notevole a causa dell'alta attività dell'acqua (0.92-0.95) e del PH nutro (6.0-6.5) che costituiscono elementi favorevoli alla proliferazione di particolari specie microbiche. Queste producono una degradazione del prodotto (variazione di colore, odore e sapore) il quale non risulta più adatto alla vendita e al consumo. Nella Figura 1.6 è stato riportato un esempio di schema di questo tipo di impianto.



**Figura 1.6 Esempio di circuito a CO<sub>2</sub> per il trattamento di prodotti alimentari**

### **1.3 Macchine a tunnel per la pastorizzazione**

I metodi di realizzazione della pastorizzazione si sono evoluti nel tempo passando da metodi semplici ad alta intensità di lavoro a metodi completamente automatizzati. I metodi più utilizzati attualmente utilizzano o pastorizzazioni in serie o pastorizzatori a tunnel.

La pastorizzazione in serie è un processo che può essere eseguito ad esempio sulla birra prima che questa sia imbottigliata o messa nelle lattine. Questo metodo richiede attrezzature di riempimento sterili e non impedisce contaminazioni biologiche da parte dei contenitori.

La pastorizzazione con macchine a tunnel, invece, richiede l'utilizzo di grandi macchinari che convogliano una grande quantità di prodotto, bevande o comunque cibo in generale già imbottigliato e imballato, attraverso zone di riscaldamento e di raffreddamento ottenuti con spruzzi d'acqua. Mediante nastri trasportatori, le bottiglie o le lattine escono dalle macchine riempitrici ben sigillate e vengono condotte attraverso varie zone a temperature ben definite. La velocità del nastro di trasporto deve essere determinata in funzione del tempo di processo necessario per far eseguire l'aumento o il calo di temperatura del prodotto. Gli aumenti o le diminuzioni di temperatura con i relativi tempi di attraversamento caratterizzano le varie zone o moduli della macchina a tunnel. L'acqua necessaria per far avvenire la variazione di temperatura del prodotto viene spruzzata dall'alto. Infatti, sul tetto di ogni modulo sono installati una serie di tubi dentro i quali scorre l'acqua alla temperatura della zona richiesta. La distanza tra due tubi successivi definisce una grandezza chiamata passo tubi. Per ogni tubo, inoltre, vengono installati degli ugelli per poter rendere il flusso d'acqua uno spray che avvolge completamente il prodotto. La pressione dell'acqua nei vari tubi è determinata dalle caratteristiche geometriche degli ugelli installati. Questi, infatti, lavorano correttamente solo in determinati range di pressione e quindi di portata dato che le due grandezze sono legate e determinano le prestazioni dei singoli ugelli verificate in laboratorio dai costruttori di questi componenti della macchina. Fuori dal campo di pressione di progetto non danno origine al corretto cono di acqua che dovrebbe avvolgere tutto il prodotto presente sul piano della zona. Anche per quanto riguarda gli ugelli, la distanza tra due ugelli consecutivi definisce una grandezza chiamata passo ugelli.

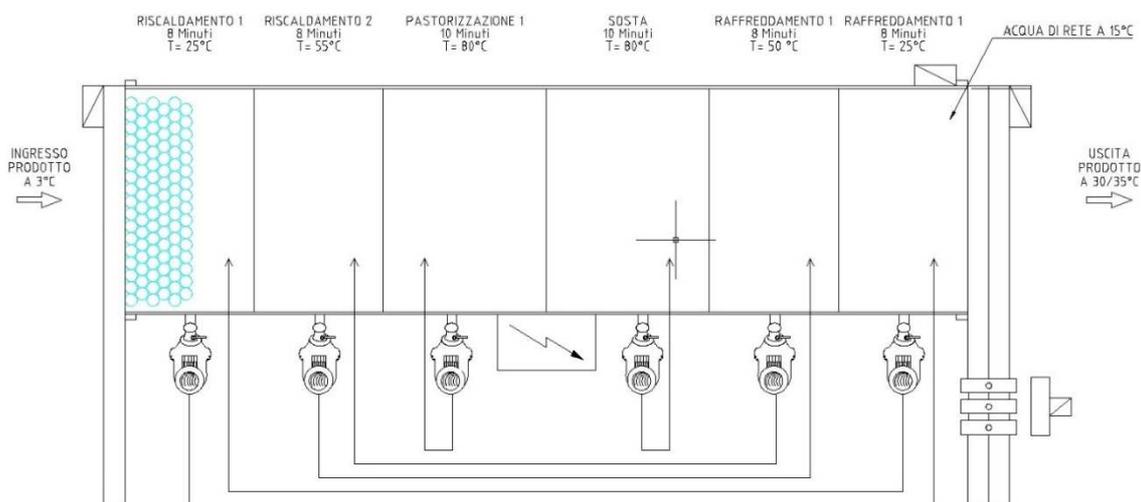
Gli ugelli utilizzati in questo processo caratterizzano la macchina stessa poiché, in base al loro principio di funzionamento, determinano prestazioni differenti. Dato l'obiettivo

delle macchine a tunnel per la pastorizzazione, ovvero scambiare con la maggiore efficienza possibile calore tra la pioggia realizzata con l'acqua di zona e i prodotti che si trovano imbottigliati sul nastro trasportatore, in fase di progetto si cerca di installare ugelli in grado di generare uno spruzzo composto da goccioline minute. Si possono quindi distinguere varie classi di ugelli: ad impatto, centrifughi a cono cavo, multipli a cono pieno, a turbolenza e a cono pieno senza vorticolatore. Una delle grandezze caratteristiche di questi componenti è l'angolo di spruzzo. Per angolo di spruzzo si intende l'angolo di apertura che il getto di goccioline dell'ugello forma al momento in cui esce dall'orifizio dell'ugello stesso ed è uno dei parametri fondamentali per la scelta di un ugello adatto e funzionale. L'ampiezza dell'angolo di spruzzo infatti, insieme alla distanza tra l'orifizio dell'ugello ed il bersaglio del getto, determina l'area di copertura dello spruzzo e la densità del liquido spruzzato rispetto all'area di copertura. A seconda del modello di ugello, le variazioni della pressione di alimentazione possono avere una grande influenza sul valore dell'angolo di spruzzo. In genere, con l'aumento della pressione gli ugelli a cono pieno producono angoli di spruzzo più stretti, gli ugelli a getto piatto producono angoli di spruzzo più ampi, mentre gli ugelli che operano in base al principio di deflessione, come gli ugelli a spirale e gli ugelli a getto piatto di stile K, subiscono di meno le variazioni di pressione. Nessun ugello può funzionare bene a valori bassi di pressione, le prestazioni peggiorano sensibilmente infatti le gocce del liquido spruzzato diventano più grandi, le geometrie di spruzzo non sono più ben definite e hanno valori di angolatura più bassi. Nelle macchine per la pastorizzazione a tunnel l'angolo di spruzzo viene usato in fase di progettazione per definire la distanza tra gli ugelli e il piano di appoggio mobile del prodotto. Questa distanza deve essere rispettata per poter essere sicuri della copertura completa del prodotto che subirà poi il trattamento termico da parte dell'acqua delle docce. Nel caso di bottiglie, ad esempio, il rischio peggiore è che il collo della bottiglia rimanga fuori dall'area bagnata dal cono dei vari ugelli compromettendo così il risultato del trattamento termico

L'importanza del componente ugello è data anche dalla grandezza fisica che spesso caratterizza le macchine a tunnel ovvero la portata specifica misurata in metri cubi ora su metro quadro. Si tratta perciò della porta di acqua necessaria per alimentare tutti gli ugelli di una zona divisa per la superficie bagnata della zona stessa.

Dato il profilo termico necessario a cui sottoporre il prodotto per ottenere il corretto processo di pastorizzazione, le macchine a tunnel vengono divise in zone. Nella prima parte si ottengono zone di riscaldamento che portano gradualmente il prodotto in temperatura e

nella seconda parte si realizzano zone di raffreddamento che riportano il prodotto alla temperatura ambiente o quella desiderata dai produttori, senza applicare differenze di temperature eccessive che potrebbero creare shock termici al prodotto e ai vari contenitori. Per poter ottimizzare l'efficienza e i consumi della macchina, le zone di raffreddamento e le zone di riscaldamento sono collegate da un punto di vista idrico. Nella Figura 1.7 viene proposto uno schema classico per questo tipo di applicazioni.



**Figura 1.7 Schema di pastore a tunnel**

L'acqua utilizzata per raffreddare il prodotto nell'ultima zona viene prelevata direttamente dalla rete perciò si trova alla più bassa temperatura possibile, a meno dell'utilizzo di batterie di raffreddamento che solo in casi particolari vengono utilizzate. Durante la fase di raffreddamento, l'acqua utilizzata si riscalda prelevando calore dal prodotto che viene trasportato dal nastro. Dato che nella prima zona il prodotto che entra nella macchina a tunnel deve subire un riscaldamento serve che l'acqua sia ad una temperatura maggiore di quella ambiente senza superare un delta limite di 20°C rispetto alla temperatura a cui si trova il prodotto poiché determinerebbe uno shock troppo elevato. Utilizzando l'acqua recuperata nelle vasche sottostanti l'ultima zona della macchina, l'impianto di riscaldamento deve usare meno potenza per poter portare questa massa di alla temperatura richiesta, riducendo quindi i consumi e aumentando l'efficienza di scambio termico generale. Anche le altre zone vengono messe in relazione come quelle descritte in precedenza, arrivando fino alla zona centrale che, siccome deve mantenere il prodotto alla più alta temperatura richiesta, funziona in maniera autonoma.

Data la grande quantità di prodotto da sottoporre a pastorizzazione, i pastorizzatori a tunnel possono assumere due tipo di configurazioni: a singolo piano o a doppio piano. Per quanto riguarda la prima configurazione, Figura 1.8, sono macchine che dispongono di un solo nastro trasportatore risultando più compatte avendo minor ingombro verticale. Per quanto riguarda la seconda configurazione, Figura 1.9, sono macchine che dispongono di due nastri trasportatori posizionati uno sotto l'altro in direzione verticale. In tale modo, il prodotto che viene trasportato nel piano superiore viene investito direttamente dalla pioggia generata dagli ugelli posti sul tetto della macchina. L'acqua, dopo aver scambiato calore con questa parte di prodotto, attraversa il nastro trasportatore dato che questo è un insieme di catene di plastica opportunamente forate. In questo modo anche il prodotto che si trova al piano inferiore viene investito dalla doccia e ne permette quindi la pastorizzazione. Ovviamente, questa configurazione richiede uno spazio verticale maggiore ma permette di elaborare un volume doppio di prodotto. La scelta viene fatta in funzione della portata oraria di bottiglie o lattine che deve essere processata e in funzione degli ingombri a disposizione all'interno dei capannoni delle aziende



**Figura 1.8 Esempio di pastorizzazione single deck**



**Figura 1.9 Esempio di pastorizzazione double deck**

Uno degli aspetti da tenere in considerazione per la scelta del pasteurizzatore a tunnel riguarda la posizione della macchina. Questa infatti si trova alla fine della catena di

produzione perciò può dover gestire delle interruzioni improvvise del ciclo produttivo dovute a malfunzionamenti oppure a interventi di manutenzione straordinari. Durante la fase di progettazione vanno quindi previsti i vari scenari di lavoro della macchina non a regime. Vengono quindi definiti cicli termici eccezionali che la macchina dovrà utilizzare solo in alcuni casi particolari.

#### **1.4 Controllo della UP a fine pastorizzazione**

Come è stato descritto in precedenza, il parametro che serve a determinare l'effettiva pastorizzazione del prodotto sottoposto al trattamento termico sono le Unità di Pastorizzazione. Alla fine della catena di produzione però non vengono misurate direttamente le UP ma viene verificata la temperatura del prodotto che è legata al numero di UP grazie alla formula (1-1).

Per verificare l'andamento della temperatura del prodotto all'interno dei contenitori che subiscono un intero ciclo di pastorizzazione viene utilizzato un metodo indiretto. Nella fase di ingresso del prodotto si introduce un campione strumentato che permette di registrare, tramite una termocoppia e un registratore di dati, la temperatura nel punto sfavorevole scelto all'interno del contenitore durante tutto il ciclo di pastorizzazione. Questo campione viene chiamato redpost (Figura 1.10) e, in base al formato delle bottiglie che si vuole sottoporre a trattamento termico, ha a disposizione sonde di temperatura di lunghezza diversa. Dai 110 mm utile per i formati minori come le lattine di alluminio ai 390 mm per i formati maggiori di bottiglie in vetro. Alla fine del ciclo il campione strumentato viene prelevato, si recuperano i dati memorizzati e si analizza il profilo di temperatura che il campione ha subito



**Figura 1.10 Esempio di Redpost**

durante il processo. Come riportato in precedenza, la temperatura viene misurata nel punto interno della bottiglia peggiore ovvero quello che reagisce più lentamente in fase di riscaldamento, ovvero quello che in gergo viene chiamato Cold Spot.

### **1.5 Cooling per linee hot fill**

Oltre alla birra, uno dei prodotti più diffusi e consumati su larga scala nel pianeta, la pastorizzazione risulta necessaria per molti altri prodotti che vengono imbottigliati o racchiusi in lattine. Un esempio, sempre per rimanere nell'ambito di sostanze liquidi, sono i succhi di frutta ovvero quei fluidi ottenuti mescolando una determinata percentuale di polpa di un determinato frutto con acqua. La percentuale può variare da 12% ad un massimo di 50% determinando una larga scala di fluidi con caratteristiche fisiche diverse. Data la diversa natura dei vari frutti utilizzati per la produzione di questi succhi, le caratteristiche fisiche dei vari succhi di frutta possono essere molto diverse fra loro. Questo comporta un diverso processo di scambio di calore all'interno del fluido stesso e di conseguenza una nuova procedura per il trattamento di questo tipo di prodotto. Ciò implica quindi una diversa configurazione anche delle macchine che servono per trattare i vari prodotti.

La principale differenza tra questi prodotti e la birra è che questi vengono imbottigliati a caldo. Infatti, il processo che viene definito Hot Fill prevede temperature di lavoro dei fluidi comprese tra gli 80°C e i 90°C. Questi quindi non devono subire un intero ciclo di pastorizzazione dato che la loro temperatura iniziale si trova al di sopra dei 60° C. Infatti, secondo la procedura efficace di pastorizzazione sarebbe questa la temperatura di riferimento oltre la quale il prodotto deve essere portato per poter inibire l'azione dei microorganismi che determinano un veloce deterioramento del prodotto, riducendo drasticamente il tempo di conservazione. Ciò semplifica il trattamento termico che deve essere eseguito alla fine del ciclo di produzione. Una volta che questi fluidi vengono imbottigliati ad alta temperatura devo poi subire solo un abbattimento o cooling. Di fatto, le macchine a tunnel utilizzate come cooler sono strutturalmente costituite da moduli del tutto simili ai pastorizzatori fatta eccezione dell'impianto idrico. Infatti, in questo tipo di applicazione, l'acqua utilizzata per il raffreddamento in una zona poi non può essere utilizzata direttamente nelle altre zone. Serve che venga raffreddata e portata alla temperatura stabilita dal ciclo termico necessario per far raffreddare adeguatamente il prodotto.

Per quanto riguarda i prodotti alimentari generici e non specifici come la birra, il punto da tenere in considerazione per il dimensionamento del raffreddatore a tunnel è il centro geometrico del contenitore (Cammalleri, 2016). Ciò è dovuto al diverso processo fisico di scambio di calore. Per quanto riguarda i cibi solidi, infatti, va considerata la storia termica al centro geometrico del contenitore dato che scambiano calore principalmente per conduzione. Il punto più sfavorito risulta essere quindi quello più distante dalle pareti. Data la geometria simmetrica dei contenitori a sezione quadrata o rettangolare oppure la geometria assialsimmetrica dei contenitori a sezione cilindrica, il punto che impiegherà il maggior tempo per poter scambiare calore sarà appunto il geometrico del volume sottoposto al processo termico (Centro Geometrico). I prodotti alimentari principalmente liquidi scambiano calore per convezione e all'interno del fluido si vengono ad installare delle celle convettive che hanno nel Cold Spot il punto più sfavorevole allo scambio termico.



**Figura 1.11 Esempio di Cooler single deck**

# Capitolo 2

## Pastorizzazione e Raffreddamento: Modelli numerici

### **2.1 Modellazione numerica del processo termico di pastorizzazione**

Dato l'obiettivo della tesi e in base agli strumenti a disposizione, ovvero i vari software di calcolo e simulazione, è stato deciso di analizzare il problema partendo da una modellazione numerica.

Data la grande esperienza accumulata sui vari problemi legati al processo di pastorizzazione nell'ambito delle applicazioni industriale da parte dell'azienda Sidel, si è deciso di iniziare lo studio dalle macchine a tunnel utilizzate per la realizzazione di questo trattamento termico. Il prodotto maggiormente sottoposto a pastorizzazione è la birra, uno dei prodotti alimentari più consumati e diffusi nel mercato internazionale. Questo prodotto viene venduto in contenitori cilindrici verticali che possono essere in alluminio, comunemente chiamate lattine, con volumi che arrivano fino ai 500 ml oppure in vetro, ovvero le classiche bottiglie, con volumi che arrivano fino a 660 ml. Questi prodotti vengono lavorati in pastorizzatori a ciclo continuo dove vengono lentamente riscaldati irrorandoli con piogge di acqua via via più calda, mantenuti sotto la pioggia a circa 70° C per alcuni minuti e poi lentamente raffreddati con piogge via via più fredde. L'operazione avviene facendo muovere i contenitori a velocità costante nella macchina a tunnel che abbiamo descritto nel capitolo precedente. Come detto, essendo grandi le portate d'acqua, riscaldante e

raffreddante, rispetto al calore ceduto e sottratto, si può immaginare che ad ogni livello la temperatura del mezzo rimanga costante.

Per ovvie ragioni di  $\Delta T$  di scambio termico, le bevande non possono entrare ed uscire dal pastorizzatore alla stessa temperatura poiché nel suo insieme l'operazione consuma energia. La conoscenza dei coefficienti di scambio termico diventa essenziale per la ricerca della situazione di ottimo economico che varia di volta in volta secondo le differenti circostanze. Il successo del processo termico sulla bevanda si può tradurre nel farle ricevere un numero minimo di unità di pastorizzazione (UP). Il rilievo sperimentale della grandezza è eseguito con un termoregistratore mobile munito di una sonda che legge la temperatura sull'asse del contenitore cilindrico verticale nel punto prossimo al fondo denominato Cold Spot (redpost). Il problema si riconduce quindi alla previsione di questa temperatura in quel punto del contenitore e alla sua variazione con il tempo in funzione della temperatura del mezzo riscaldante e raffreddante ovvero l'acqua erogata sotto forma di doccia. Si cercherà quindi di elaborare un modello matematico in grado di poter descrivere tale fenomeno.

Il contenitore della bevanda, lattina in alluminio o bottiglia in vetro, può essere schematizzato in prima approssimazione come un cilindro completamente pieno. La parete cilindrica esterna verrà percorsa da un film cadente di acqua riscaldata o raffreddante ed è qui che viene a verificarsi lo scambio termico. Il suo moto può essere laminare o turbolento in funzione del numero di Reynolds, formula (2-1)

$$Re_f = \frac{4 * W_f}{\pi * d' * f * \mu_f} \quad 2-1$$

dove:

- $W_f$  è la portata del film cadente [kg/s]
- $d'$  è il diametro esterno del contenitore [m]
- $f$  è il coefficiente di scambio termico del film [ $W/m^2 K$ ]
- $\mu_f$  è la viscosità dinamica del film cadente [Pa\*s]

Dai lavori descritti da Bird, Stewart e Lightfoot nel loro libro di testo Transport Phenomena (Bird, Stewart, & Lightfoot, 1960) si possono ottenere le seguenti espressioni per i coefficienti di scambio termico  $h_f$  del film cadente

$$h_f = 1.32 * \left( \frac{k_f^3 * \rho_f^2 * g}{\mu_f^2} \right)^{1/3} * (Re_f)^{-1/3} \quad \text{moto laminare} \quad 2-2$$

$$h_f = 0.028 * \left( \frac{k_f^3 * \rho_f^2 * g * W_f}{\pi * d' * f * \mu_f^3} \right)^{1/3} \quad \text{moto turbolento} \quad 2-3$$

dove:

- $k_f$  è la conducibilità termica del film [W/m K]
- $\rho_f$  è la densità del film esterno [kg/m<sup>3</sup>]
- $g$  è l'accelerazione di gravità [m/s<sup>2</sup>]

Per quanto riguarda le condizioni in cui si trovano le altre superficie del contenitore cilindrico, si può considerare che quella circolare superiore risulta bagnata da acqua riscaldante o raffreddante praticamente ferma e quella inferiore appoggia sul nastro trasportatore bagnato che possiede la temperatura dell'ambiente. Come descritto da McAdams nel libro di testo *Heat Transmission* (Mc Adams, 1954) si possono ottenere le espressioni per il coefficiente di scambio termico per convezione naturale da superfici orizzontali in funzione dei numeri adimensionali di Grashof (Gr) e Prandtl (Pr).

$$Gr = \frac{d'^3 * \rho_f^2 * g * \beta_f * \Delta T_f}{\mu_f^2} \quad 2-4$$

$$Pr = \frac{C_{p,f} * \mu_f}{k_f} \quad 2-5$$

dove

- $C_{p,f}$  calore specifico del film [J/kg K]
- $\beta_f$  è il coefficiente di espansione volumetrica [1/°C]

per l'acqua l'espressione del coefficiente di espansione volumetrica in funzione della temperatura è espressa dalla formula 2.6

$$\beta_f = -6.427 * 10^{-5} * T_f + 8.5 * 10^{-6} * T_f^2 + 6.79 * 10^{-8} * T_f^3 \quad 2-6$$

Per superfici riscaldate, rivolte verso l'alto o raffreddate, rivolte verso il basso, se si considera il prodotto dei due numeri adimensionali di Grashof (Gr) e Prandtl (Pr) come X

$$X = Gr * Pr \quad 2-7$$

Si possono ricavare i coefficienti

$$\frac{h_f * d'}{k_f} = 0.54 * (X)^{1/4} \quad \begin{array}{l} \text{regime laminare} \\ 10^5 \leq X \leq 2 * 10^7 \end{array} \quad 2-8$$

$$\frac{h_f * d'}{k_f} = 0.14 * (X)^{1/3} \quad \begin{array}{l} \text{regime turbolento} \\ 2 * 10^7 \leq X \leq 3 * 10^{10} \end{array} \quad 2-9$$

Per superfici riscaldate, rivolte verso il basso o raffreddate, rivolte verso l'alto

$$\frac{h_f * d'}{k_f} = 0.27 * (X)^{1/4} \quad \begin{array}{l} \text{moto laminare} \\ 3 * 10^5 \leq X \leq 3 * 10^{10} \end{array} \quad 2-10$$

Si può però affermare che il contributo delle superfici orizzontali al riscaldamento risulta trascurabile.

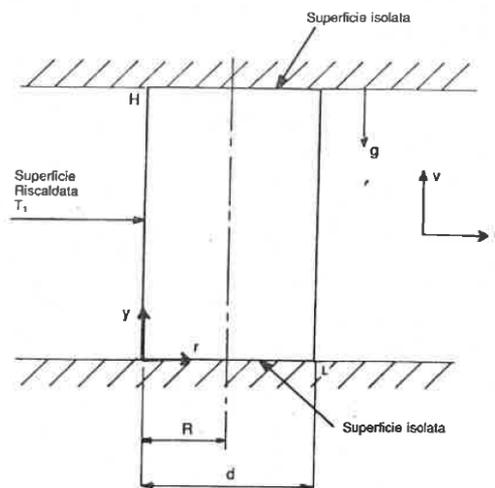
All'interno del contenitore, in seguito al processo di riscaldamento o al raffreddamento dovuti all'esterno, si generano dei moti convettivi nella massa liquida che contribuiscono allo scambio termico nella massa stessa. Diventa quindi necessario schematizzare il comportamento del fluido e non utilizzare semplicemente il coefficiente di

scambio termico valido per l'interno del contenitore. Questo permetterebbe di stimare la quantità di calore che viene scambiata con la massa del fluido ma non descrive la distribuzione della temperatura all'interno della massa stessa durante i fenomeni convettivi che vengono a generarsi durante la fase transitoria.

## **2.2 Equazioni del modello numerico dello scambio termico**

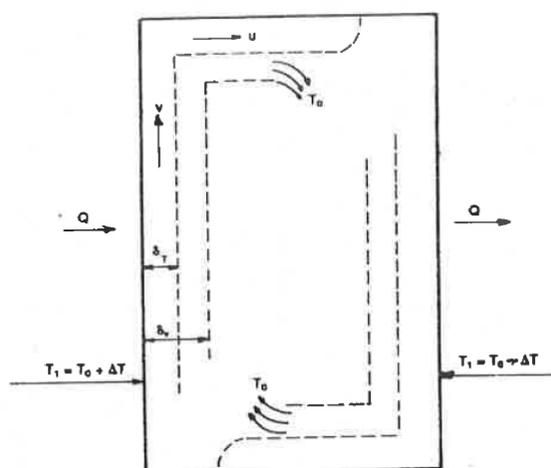
L'obiettivo dello studio deve essere invece quello di poter definire numericamente un profilo di temperatura in prossimità dell'asse, data la assialsimmetria, del contenitore in particolar modo si è interessati alla zona in prossimità del fondo dove si trova il cosiddetto Cold Spot. Si andranno ad esaminare e ad usare come linee guida quelle riportate da Guerreri Rase nel libro di testo dedicato alla Progettazione degli impianti industriali chimici e alimentari, (Guerreri & Rase, 2002)

Per potere esaminare il moto convettivo del fluido interno al contenitore è necessario schematizzarlo come un volume cilindrico verticale chiuso di altezza  $H$  e di diametro  $d$  (di raggio  $R$ ) come riportato nella Figura 2.1. Si ipotizza che il volume sia completamente pieno del liquido sottoposto a trattamento termico, che sia in quiete ( $v = u = 0$ ), con una temperatura iniziale uniforme  $T_0$  e con caratteristiche riconducibili a quelle dell'acqua ovvero fluido Newtoniano con numero di Prandtl maggiore di 1.



**Figura 2.1 Schema del contenitore cilindrico**

La parete cilindrica è quella che viene riscaldata a temperatura uniforme e costante  $T_1$  invece e altre due, quelle circolari orizzontali, le si possono schematizzare come perfettamente isolate. Non appena inizia il riscaldamento istantaneo, il liquido che si trova a contatto con la parete cilindrica si dilata e si muove verso l'alto. Negli studi di Patterson e Imberger (Patterson & Imberger, 1980) viene descritto in maniera dettagliata un possibile meccanismo di ciò che accade lungo una parete verticale riscaldata e in corrispondenza delle pareti orizzontali isolate di un parallelepipedo, a sezione rettangolare, in cui il calore, in regime non stazionario, viene somministrato ad una parete verticale e sottratto dalla parete verticale opposta come schematizzato nella Figura 2.2.

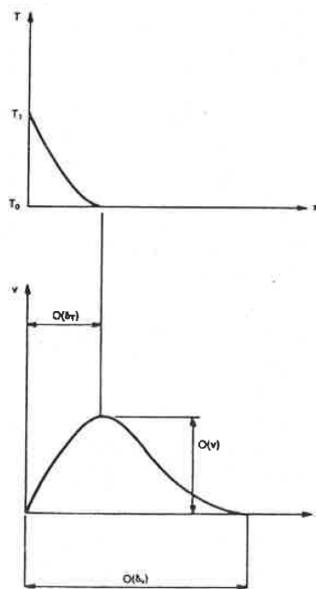


**Figura 2.2** Schema dello scambio di calore all'interno del contenitore cilindrico

Lungo la parete verticale riscaldata viene quindi a formarsi uno strato termico di spessore  $O(\delta_T)$  attraverso il quale la temperatura degrada da  $T_1$  a  $T_0$ . Questo si muoverà verso l'alto per effetto del galleggiamento con un profilo di velocità  $v$  che risulta nulla a contatto della parete, raggiunge il suo massimo ad una distanza della parete  $O(\delta_T)$  e poi degrada fino ad annullarsi ad una distanza dalla parete  $O(\delta_v)$ . Nei grafici della Figura 2.3 vengono riportati gli sviluppi della struttura bilaminare adiacente alla parete riscaldata.

La struttura che nasce è quindi costituita da due strati: un primo strato caldo, trainante, di spessore  $O(\delta_T)$  il quale devia orizzontalmente lungo la parete isolata e un secondo strato freddo, trainato, di spessore  $(\delta_v - \delta_T)$  che si riversa nella cavità quando raggiunge la parete isolata. Nel caso il processo sia quello opposto, ovvero di

raffreddamento, avviene lo stesso fenomeno con le direzioni di segno contrario. Le considerazioni fatte per la geometria rettangolare valgono anche per un volume cilindrico ad asse verticale di cui si considera una striscia di parete laterale riscaldata di larghezza unitaria. Ciò può essere affermato perché la curvatura della parete non è così rilevante poiché  $(\delta_T)$  e  $(\delta_V)$  sono molto minori di  $R$ . La soluzione del problema con una approssimazione dello strato limite rimane valida poiché la sezione trasversale dello strato limite è piccola in confronto a quella della cavità, come viene confermato dagli studi fatti e riportati da Lighthill nel libro di testo *Waves in Fluids*, (Lighthill, 1965). La considerazione da fare che rende il caso differente è che per un volume cilindrico tutto il calore  $Q$  non viene somministrato da un lato e poi sottratto da quello opposto ma tutta la parete cilindrica è soggetta alla somministrazione del calore  $Q$ . Questo si andrà ad accumulare nella cavità.



**Figura 2.3 Andamento di temperatura e velocità dello strato bilaminare a parete**

Per descrivere matematicamente il fenomeno si devono prendere in considerazione le equazioni di conservazione della massa (2-11), conservazione della quantità di moto in direzione  $x$  (2-12) e in direzione  $y$  (2-13) e conservazione dell'energia (2-14) in ogni punto della cavità. Verranno considerate le equazioni approssimate dato che si considera il caso con densità  $\rho$  costante.

$$\frac{\delta u}{\delta r} + \frac{u}{r} + \frac{\delta y}{\delta x} = 0 \quad 2-11$$

$$\frac{\delta u}{\delta t} + u \frac{\delta u}{\delta r} + v \frac{\delta u}{\delta y} = -\frac{1}{\rho} * \left( \frac{\delta p}{\delta r} \right) + v * \left( \frac{\delta^2 u}{\delta r^2} + \frac{1}{r} * \frac{\delta u}{\delta r} - \frac{1}{r^2} + \frac{\delta^2 u}{\delta y^2} \right) \quad 2-12$$

$$\frac{\delta v}{\delta t} + u \frac{\delta v}{\delta r} + v \frac{\delta v}{\delta y} = -\frac{1}{\rho} * \left( \frac{\delta p}{\delta y} \right) + g + v * \left( \frac{\delta^2 v}{\delta r^2} + \frac{1}{r} * \frac{\delta v}{\delta r} + \frac{\delta^2 v}{\delta y^2} \right) \quad 2-13$$

$$\frac{\delta T}{\delta t} + u \frac{\delta T}{\delta r} + v \frac{\delta T}{\delta y} = \alpha * \left( \frac{\delta^2 T}{\delta r^2} + \frac{1}{r} * \frac{\delta T}{\delta r} + \frac{\delta^2 T}{\delta y^2} \right) \quad 2-14$$

### **2.3 Analisi di scala e ipotesi semplificative per la soluzione del modello**

Anziché risolvere matematicamente le equazioni soprariportate conviene fare alcune considerazioni di scala e prevedere teoricamente il moto e lo scambio termico all'interno della cavità cilindrica. Questo tipo di considerazioni sono state sviluppate da Patterson e Imberger (Patterson & Imberger, 1980). Se si assume che il  $\Delta T$  per la temperatura,  $t$  per il tempo,  $\delta_r$  per  $\delta_r$  e  $H$  per  $\delta_y$  siano le scale per le variazioni della temperatura  $T$ , del tempo  $t$ , dello spostamento lungo  $r$  e dello spostamento lungo  $y$  al tempo iniziale ( $t=0$ ). Inoltre, il fluido in corrispondenza della parete cilindrico ( $r=R$ ), all'istante iniziale ( $t=0$ ) è in quiete e di conseguenza  $u=v=0$ . In base a queste considerazioni l'equazione 2-14 può essere scritta come

$$\frac{\Delta T}{t} \approx \alpha * \frac{\Delta T}{\delta_r^2} \quad 2-15$$

Poiché i due termini convettivi sono nulli e dei tre termini conduttivi rimane rilevante solo il primo dato che

$$\frac{\Delta T}{\delta_T^2} \gg \frac{1}{R} * \frac{\delta T}{\delta r}$$

$$\frac{\Delta T}{\delta_T^2} \gg \gg \frac{\Delta T}{H^2}$$

Date queste considerazioni si può dire che l'assunzione fatta in precedenza, ovvero che la curvatura non infici il comportamento dello stato limite, sia accettabile dato che si arriva alla stessa conclusione che si potrebbe ottenere dall'analisi di una sezione con pareti piane.

Dall'equazione 2-15 si può dedurre che negli istanti successivi a quello iniziale la parete cilindrica interna viene rivestita con uno strato conduttore il cui spessore aumenta secondo l'equazione 2-16

$$\delta_T \approx (\alpha * t)^{1/2} \quad 2-16$$

Lo strato caldo  $\delta_T$  tende naturalmente a salire lungo la parete riscaldata. La scala della velocità  $v$  di questo moto ascensionale è più facile da veder se prima si trascura il termine di pressione  $p$  dalle equazioni del moto 2-12 e 2-13. Considerando il fluido incomprimibile,  $\rho$  costante, il termine gravitazione  $g$  viene sostituito dall'equazione 2-17

$$g * [1 - \beta(T - T_0)] \quad 2-17$$

Si ottiene quindi l'equazione 2-18

$$\begin{aligned} \frac{\delta}{\delta y} \left( \frac{\delta u}{\delta t} + u * \frac{\delta u}{\delta r} + v * \frac{\delta u}{\delta y} \right) - \frac{\delta}{\delta r} \left( \frac{\delta v}{\delta t} + u * \frac{\delta v}{\delta r} + v * \frac{\delta v}{\delta y} \right) = \\ = v \left( \frac{\delta}{\delta y} \left( \frac{\delta^2 u}{\delta r^2} + \frac{1}{r} * \frac{\delta u}{\delta r} - \frac{u}{r^2} + \frac{\delta^2 u}{\delta y^2} \right) - \frac{\delta}{\delta r} \left( \frac{\delta^2 v}{\delta r^2} + \frac{1}{r} * \frac{\delta v}{\delta r} + \frac{\delta^2 v}{\delta r^2} \right) \right) \\ + g \beta \frac{\delta_T}{\delta r} \end{aligned} \quad 2-18$$

In questa equazione sono evidenziati tre gruppi fondamentali di termini. Nella parte a sinistra dell'uguale sono presenti i sei termini inerziali. Alla destra dell'uguale invece ci sono sette termini di diffusione viscosa e un termine di galleggiamento. I termini che dominano nei tre gruppi fondamentali sono:

$-\frac{\delta^2 v}{\delta r \delta t}$	$-v \frac{\delta^3 v}{\delta r^3}$	$g \beta \frac{\delta T}{\delta r}$
per l'inerzia	per l'attrito	per il galleggiamento

Questi risultati sono ottenuti considerando per ogni gruppo i valori in termini di scala. La forza che conduce il fenomeno è il galleggiamento che è costituito da un termine finito. Diventa quindi importante distinguere se l'effetto del galleggiamento viene bilanciato dal contributo dell'attrito o dal contributo dell'inerzia. I tre termini scritti in termini di scala diventano:

$\frac{v}{\delta_T * t}$	$\frac{v * v}{\delta_T^3}$	$g \beta \frac{\Delta T}{\delta_T}$
per l'inerzia	per l'attrito	per il galleggiamento

Dividendo ogni contributo per la scala dell'attrito si ottiene

$\frac{k}{\rho * c_p * v} = \frac{k}{\mu * c_p} = \frac{1}{Pr}$	1	$\frac{g * \beta * \Delta T * \delta_T^2}{v * v}$
per l'inerzia	per l'attrito	per il galleggiamento

Quindi per fluidi Newtoniani con numero di Prandtl dell'ordine di 1 o maggiore di 1, con il bilancio della quantità di moto all'istante iniziale (t=0) si ottiene l'equazione 2-19

$$1 \approx \frac{g * \beta * \Delta T * \delta_T^2}{v * v} \quad 2-19$$

Dalla quale si ottiene la scala della velocità iniziale

$$v \approx \frac{g * \beta * \Delta T * \delta_T^2}{\nu} \quad 2-20$$

L'equazione 2-16 esprime la scala della velocità del primo movimento del fluido. Una volta iniziato questo movimento, il calore trasmesso dalla parete nello spessore di fluido  $\delta_T$  non è più spesso solamente per aumentare lo spessore dello strato  $\delta_T$  ma parte di questo calore viene trasportato dallo strato di spessore  $\delta_T$  che sale alla velocità  $v$ . Quindi, dall'equazione di conservazione dell'energia 2-10, si può rilevare una competizione tra tre distinti effetti:

$\frac{\Delta T}{t}$	$v * \frac{\Delta T}{H}$	$\alpha * \frac{\Delta T}{\delta_T^2}$
inerzia	convezione	conduzione

Con il passare del tempo, prendendo in considerazione l'equazione 2-16, si può dedurre che l'effetto convettivo aumenta e l'effetto di inerzia diminuisce. A un certo istante finale  $t_f$  per cui l'equazione dell'energia esprime un bilancio tra il calore condotto dalla parete e l'entalpia trasportata verticalmente per l'effetto di galleggiamento, ovvero

$$v * \frac{\Delta T}{H} \approx \alpha * \frac{\Delta T}{\delta_T^2} \quad 2-21$$

Sostituendo l'espressione della scala di  $v$ , equazione 2-20, si ottiene

$$t_f = \left( \frac{v * H}{g * \beta * \Delta T * \alpha} \right)^{1/2} \quad 2-22$$

All'istante  $t_f$ , usando l'equazione 2-16, si ottiene il corrispondente spessore  $\delta_{T,f}$

$$\delta_{T,f} = (\alpha * t_f)^{1/2} \quad 2-23$$

Se si prende in considerazione il numero adimensionale di Rayleigh, il quale caratterizza il regime del moto di un fluido in convezione naturale, alla sommità del contenitore, ovvero ad una altezza H, equazione 2-24,

$$Ra_H = \left( \frac{g * \beta * \Delta T * H^3}{\alpha * \nu} \right) \quad 2-24$$

e si combinano le ultime tre equazioni si ottiene l'equazione 2-25

$$\delta_{T,f} = H * (Ra_H)^{-1/4} \quad 2-25$$

Analizzando il bilancio proposto nella equazione 2-21, per gli istanti successivi all'istante  $t_f$  il bilancio viene preservato solamente se la velocità  $v$  e lo spessore non aumentano più con il tempo. Quindi per tutti gli istanti successivi a  $t_f$  lo strato termico raggiunge uno stato inalterato caratterizzato dal bilancio energetico tra la conduzione e la convezione ed un bilancio di quantità di moto tra il galleggiamento e la diffusione viscosa.

Oltre lo spessore termico  $\delta_{T,f}$ , la parete laterale sviluppa un getto di parete di tipo viscoso. Il suo spessore  $\delta_v$  si ottiene e dalla equazione di quantità di moto per la regione di spessore  $x = \delta_v$  esterna allo strato termico. In questa regione, l'effetto di galleggiamento è trascurabile e si realizza un bilancio tra l'inerzia e la diffusione viscosa, equazione 2-26

$$\frac{v}{\delta_v * t} \approx \nu * \frac{v}{\delta_v^3} \quad 2-26$$

dalla quale si ricava l'equazione 2-27

$$\delta_v \approx (\nu * t)^{1/2} \approx Pr^{1/2} * \delta_T \quad 2-27$$

In condizioni stazionare, il fluido vicino a ciascuna parete è caratterizzato da una struttura a due strati:

- uno strato limite termico di spessore  $\delta_{T,f}$
- uno strato di spessore maggiore  $\delta_{T,v}$

Nel caso in cui lo spessore dello strato limite termico  $\delta_{T,f}$  sia minore del raggio R, lo strato riguarda solo una porzione del fluido ovvero , prendendo in considerazione l'equazione 2-25

$$\frac{H}{R} < (Ra_H)^{1/4} \quad 2-28$$

Con l'equazione 2-28 si può arrivare a dire che gli strati verticali diventano convettivi in un tempo minore del tempo di diffusione termica tra la parete verticale e l'asse del contenitore. Per dirlo si consideri l'equazione 2-16

$$\frac{R^2}{\alpha} > t_f \quad 2-29$$

Il caso contrario sarebbe quello in cui il trasporto di calore sia per sola conduzione all'interno del liquido ovvero che

$$\delta_{T,f} = R \quad 2-30$$

che significa il verificarsi delle condizioni descritte nelle equazioni 2-31

$$t_f > \frac{R^2}{\alpha} \quad \frac{H}{R} = (Ra_H)^{1/4} \quad 2-31$$

Usando dati derivanti l'esperienza pratica maturata negli anni dall'azienda si può affermare che il tempo necessario affinché si verifichi lo scambio di calore con solo questo fenomeno fisico è superiore all'ora e mezza. Si tratta quindi di un processo troppo lento che non si verifica durante il processo di pastorizzazione. Il criterio per uno strato limite viscoso è quindi espresso dalla seguente espressione

$$\frac{H}{R} < (Ra_H)^{1/4} * (Pr_H)^{-1/2} \quad 2-32$$

L'analisi di scala presentata può essere estesa per considerare ciò che accade in prossimità delle pareti orizzontali adiabatiche per poter prevedere i profili di temperatura e di velocità di una sezione verticale del contenitore. Una discussione dettagliata di ciò che accade nelle prossimità delle pareti adiabatiche è presentata da Paterosn e Imberger. Riprendendo ciò che si è dedotto dagli studi di Bejan e applicarlo a un contenitore cilindrico da cui emerge che, se la diffusione termica tra le due pareti isolate è trascurabile si ha l'equazione 2-33

$$\frac{H}{R} > (Ra_H)^{-1/4} \quad 2-33$$

Se questa condizione è rispettata, le correnti orizzontali lungo le pareti isolate mantengono le loro identità termiche, come si vede dalla Figura 2.2.

Dall'analisi di scala riportate in precedenza quindi si possono ricavare per un fluido con numero di Prandtl maggiore di uno, le seguenti scale

**Tabella 2.1 Ordini di grandezza delle caratteristiche del getto bilaminare**

Spessore dello strato termico	Distanza del picco dalla parete verticale	Spessore del getto	Velocità	Numero di Nu
$O(\delta_T)$		$O(\delta_v)$	$O(v)$	$h^*H/k$
$H * (Ra_H)^{-1/4}$	$H * (Ra_H)^{-1/4}$	$Pr^{1/2}(H)(Ra_H)^{-1/4}$	$\frac{\alpha}{H} * (Ra_H)^{-1/4}$	$(Ra_H)^{-1/4}$

Date le considerazioni fatte in precedenza per il numero di Rayleigh, si possono ottenere le quattro grandezze riportate nella precedente tabella in funzione della distanza "y" lungo la parete verticale. Integrando lungo tutta la parete H, si ottiene che il coefficiente di scambio termico  $h_{O-H}$  media equivale a

$$h_{O-H} = \frac{4}{3} h_{y=H} \quad 2-34$$

**Tabella 2.2 Variazione con “y” delle caratteristiche del getto bilaminare**

Spessore dello strato termico	Distanza del picco dalla parete verticale	Spessore del getto	Velocità	Coefficiente di scambio
$O(\delta_T)$	$O(\delta_T)$	$O(\delta_v)$	$O(v)$	h
$y^{1/4}$	$y^{1/4}$	$y^{1/4}$	$y^{1/4}$	$y^{-1/4}$

Come riportato nel libro di testo Convection Heat Transfer di Bejan (Bejan, 1984) si può adottare una soluzione di tipo integrale delle equazioni fondamentali, conservazione della massa (2-11), conservazione della quantità di moto in direzione x (2-12) e in direzione y (2-13) e conservazione dell'energia (2-14) in ogni punto della cavità. Questo tipo di approccio è stato sviluppato anche da Pohlhausen e Von Karman e consente di determinare la reale variazione in funzione di “y” del calore scambiato, dello spessore dello strato termico e del profilo della velocità del getto alla parete. Per poter utilizzare questo tipo di approccio e in coerenza con i profili di temperatura e di velocità riportati nella figura 2.3, sono state utilizzate rispettivamente le espressioni 2.33 e 2.34.

$$T - T_0 = \Delta T * e^{-x/\delta'_T} \quad 2-35$$

$$v = V * e^{-x/\delta'_T} * (1 - e^{-x/\delta'_T}) \quad 2-36$$

dove

- $\Delta T = T_1 - T_0 = \text{costante}$
- $V, \delta'_T$  e  $\delta'$  sono incognite funzione della lunghezza “y”.

La soluzione delle equazioni fondamentali con questo approccio e con l'ausilio delle due equazioni precedenti consentono di ottenere le equazioni 2-37 e 2-38

$$\frac{\delta'}{\delta_T'} = \left( \frac{6}{5} * Pr \right)^{1/2} \quad 2-37$$

$$Nu = 0.783 * (Ra)_y^{1/4} \quad 2-38$$

che confermano i risultati ottenuti con l'analisi di scala. Nella Tabella 2.3 sono state raccolte le espressioni delle varie grandezze con le nuove relazioni ottenute. Queste descrivono con buona approssimazione le funzioni di velocità e temperatura nel film termico di spessore  $\delta_T$  e viscosa  $\delta_v$  in funzione della coordinata "y".

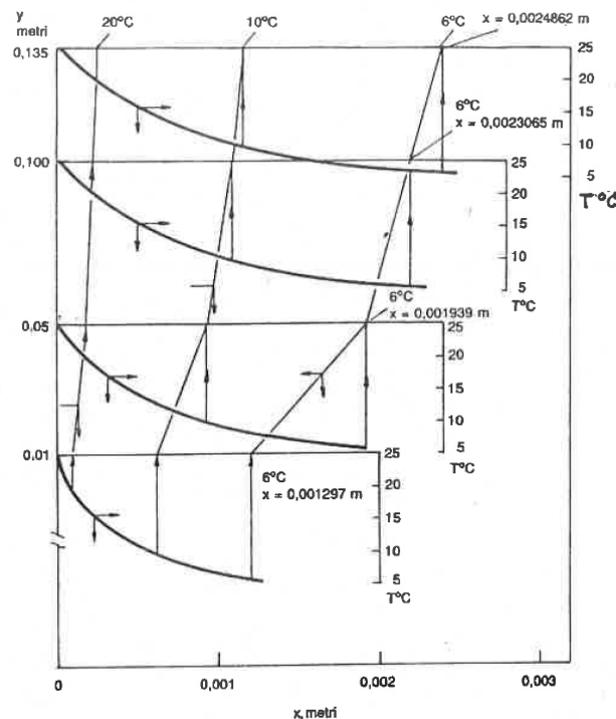
**Tabella 2.3 Valori delle grandezze caratterizzanti il getto in funzione di "y"**

Spessore dello strato termico	Distanza del picco dalla parete verticale	Spessore del getto
$\delta_T = \frac{y}{0.783 * (Ra)_y^{1/4}}$	$\delta_T = \frac{y}{0.783 * (Ra)_y^{1/4}}$	$\delta_v = \frac{y * Pr^{1/2}}{0.783 * (Ra)_y^{1/4}}$
Velocità		Coefficiente di scambio
$v = \frac{\alpha}{y} * 0.61309 * (Ra)_y^{1/4}$		$Nu = 0.783 * (Ra)_y^{1/4}$

## **2.4 Algoritmo di calcolo per ottenere la soluzione del modello**

Assunte quindi alcune ipotesi semplificative del problema preso in esame, ovvero quello di un film che si riscalda a contatto della parete cilindrica esterna che percorre poi l'interno del contenitore e continua a riscaldarsi in passaggi successivi, si continua a studiare numericamente il problema. Ovviamente l'operazione di riscaldamento, che è continua nel tempo, porta con sé un gradiente di temperatura lungo la parete riscaldante e lungo l'asse del

contenitore, a causa dell'accumulo di calore. Per questo motivo la temperatura sarà crescente verso l'alto. Differente sarebbe la situazione in un processo senza accumulo di calore ovvero nel caso in cui ci sia una parete riscaldante contrapposta ad una parete raffreddante. Ciò nonostante, si può immaginare di descrivere il fenomeno come una successione di stati del tipo descritto dalla Figura 2.4, ciascuno differente dal precedente e dal seguente per effetto del calore accumulato del quale bisogna tenere conto mediante i bilanci termici. Minore è l'intervallo di tempo che separa due stati successivi e migliore sarà la descrizione del fenomeno dato che ci si avvicina maggiormente alla realtà. Dato che il tempo necessario, per la fase di riscaldamento o per la fase di raffreddamento, è dell'ordine di 25-30 minuti e il tempo necessario al film per compiere il percorso di un giro è dell'ordine di 1 minuto, si può ragionevolmente assumere, nella schematizzazione del calcolo, un intero giro come corrisponde ad uno stato come quello proposto nella Figura 2.4.



**Figura 2.4 Profili di temperatura in funzione della coordinata  $x$  nel film a  $y$  fissata e profili di  $y$  in funzione della coordinata  $x$  a  $T$  costante ( $T_1=5^\circ\text{C}$  e  $\Delta T=20^\circ\text{C}$ )**

Si può quindi pensare di stimare il tempo per il percorso di un giro del come il rapporto, equazione 2-39

$$t = \frac{2 * (\text{altezza del contenitore} + \text{raggio})}{\text{velocità massima del film}} \quad 2-39$$

Con questa formula si ottiene un valore del tempo che può essere sicuramente perfezionato con rilievi sperimentali eseguiti su particolari contenitori di interesse. L'analisi numerica può evidenziare il reale percorso del film e la variazione del suo profilo di velocità lungo il percorso. Questi elementi possono illuminare consentire la stima di un termine correttivo per il tempo. Con tutta probabilità il tempo stimato con la formula 2-39 è maggiore del tempo reale perché il percorso è minore del termine riportato al numeratore.

Sulla base di tutte le considerazioni riportate in questo capitolo, è stato perfezionato un procedimento di calcolo per predire l'andamento della temperatura in prossimità del fondo del contenitore, più precisamente lungo il suo asse verticale, in funzione del tempo  $t$ . I punti da seguire sono:

- 1) Stimare, con le espressioni 2-1 e 2-3, il coefficiente  $h_f$  di scambio termico esterno al contenitore
- 2) Dato uno spessore e un materiale del contenitore, stimare la sua resistenza  $r_l$  al trasporto di calore (coefficiente  $h_l$ )
- 3) Per la temperatura  $T_f$  dell'acqua esterna di riscaldamento e per la temperatura  $T_0$  della bevanda, stimare un  $\Delta T = T_f - T_0$  di primo tentativo con il quale calcolare  $(Ra)_H$ , con l'espressione 2-24, per l'altezza  $H$  del contenitore.
- 4) Stimare un coefficiente locale di scambio termico interno  $h_{y=H}$  di primo tentativo con l'equazione 2-40

$$h_{y=H} = \frac{(0.2995) * (Ra)_H^{1/4} * k}{y_H} = \frac{k}{\delta_T} \quad 2-40$$

- 5) Con  $h_f$ ,  $h_l$  e  $h_{y=H}$  stimare un coefficiente locale totale  $h_{tot}$  di primo tentativo
- 6) Stimare una temperatura  $T_m$  della bevanda a contatto con la parete interna del contenitore usando l'equazione 2-41

$$T_m = T_f - \Delta T * \frac{h_{tot} * (h_l + h_f)}{h_l * h_f} \quad 2-41$$

- 7) Calcolare un valore di primo tentativo di  $(\Delta T)' = T_m - T_0$  con il quale calcolare un nuovo valore di  $(Ra)_H$  per l'altezza  $y_H$  del contenitore
- 8) Si eseguono calcoli iterativi fino ad ottenere un valore di  $T_m$  sufficientemente approssimato rispetto al precedente
- 9) Calcolare il coefficiente di scambio termico medio  $h_{0-H}$  per l'intera altezza  $H$  del contenitore e quindi il coefficiente di scambio totale per l'intera altezza da 0 a  $H$

$$h_{0 \rightarrow H} = \frac{3}{4} h_{y=H} \quad 2-42$$

$$\frac{1}{h_{tot}} = \frac{1}{h_{0 \rightarrow H}} + \frac{1}{h_1} + \frac{1}{h_f} \quad 2-43$$

- 10) Calcolare il calore "q" trasmesso nella unità di tempo attraverso una superficie larga 0.01 m e di altezza  $H$  espressa in metri

$$q = h_{tot} * \Delta T * H * 0.01 \quad 2-44$$

- 11) Calcolare la velocità massima del film per  $y=H$

$$v_{max} = \frac{\alpha}{y_H} * (0.63163) * (Ra)_H^{1/2} \quad 2-45$$

- 12) Calcolare lo spessore termico del film  $\delta_T$  per  $y=H$

$$\delta_{T,y=H} = \frac{y_H}{(0.2995) * (Ra)_H^{1/4}} \quad 2-46$$

- 13) Calcolare la temperatura media del film che abbandona la sommità della parete del contenitore e si ripresenta alla base per un altro ciclo di riscaldamento

$$T_2 = \frac{q}{(0.01) * (\delta_{T,y=H}) * (v_{max}) * (1000) * (4186) * (0.84732)} + T_0 \quad 2-47$$

14) Calcolare il tempo  $t$  per il primo ciclo

$$t = \frac{2 * (y_H + R)}{v_{max}} \quad 2-48$$

15) Assumere il nuovo  $T_0=T_2$  e ripetere il calcolo per i successivi cicli di riscaldamento

Data la necessità di eseguire dei calcoli iterativi è stato scelto di implementare la procedura descritta per punti in ambiente Matlab. Per fare questo, si è suddiviso il volume di fluido in  $n$  elementi in direzione assiale e con 2 elementi in direzione radiale (uno nello strato termicamente alterato e uno al di fuori) come vie mostrato nella Figura 2.5. Con le frecce rosse vengono evidenziate le portate fluenti in parete calcolate integrando i profili di velocità. Con le frecce in verse vengono indicati i flussi per la chiusura dei bilanci di massa. Il fluido quindi inizia il ciclo toccando la parete laterale nella zona inferiore con una temperatura che equivale a quella del cold spot  $T_0$  e si allontana dalla parete quando raggiunge la temperatura  $T_2$  ottenuto con il bilancio di energia dato il valore noto di  $Q$ . I bilanci di massa e di energia consentono di valutare l'evolvere della temperatura nel generico elemento  $i$ . Più in particolare, è possibile grazie al codice individuare il valore della temperatura al cold spot che è l'obiettivo dello studio e del modello elaborato.

Nella Figura 2.6 viene riportato un esempio dei risulta che si possono ottenere con lo script elaborato in ambiente Matlab. Dati gli intervalli di tempo utilizzati per le varie zone del ciclo termico che si vuole verificare si può far riportare a monitor la storia termica del prodotto nel punto di interesse. Le due curve riportano la storia termica in due punti del volume. La line rossa è il profilo di temperatura in funzione del tempo del punto a temperatura più elevata detto Hot Spot. La line azzurra è il profilo di temperatura in funzione del tempo del punto a temperatura più bassa detto Cold Spot. I punti neri sono i valori di temperatura utilizzati per la taratura. Ovviamente si tratta di un modello quindi e può incorrere in errori di modellazione ma rappresenta un adeguato metodo di analisi.

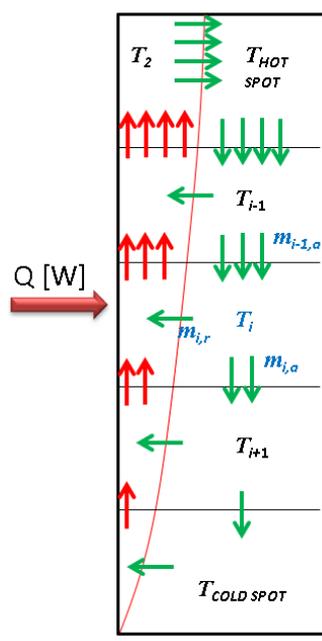


Figura 2.5 Suddivisione del volume in direzione assiale con  $n$  elementi con i relativi flussi

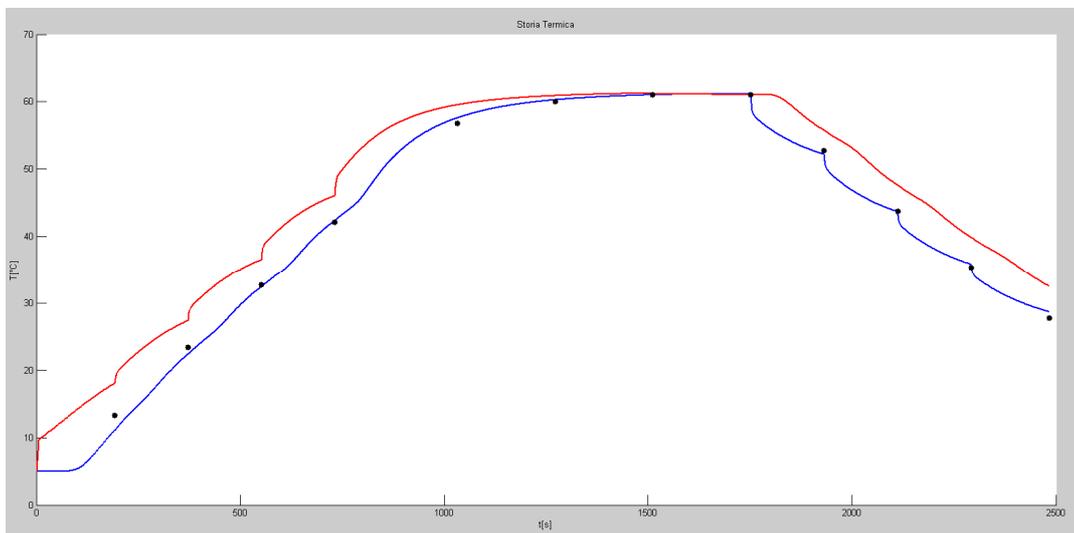


Figura 2.6 Storia termica del prodotto risultato del modello implementato in ambiente Matlab

## **2.5 Altri modelli numerici per sistemi di pastorizzazione a tunnel**

Quello descritto nei paragrafi precedenti di questo capitolo è uno dei possibili modelli implementabili con un software di calcolo per ottenere la storia termica del prodotto in determinati punti all'interno del fluido. In letteratura sono presenti altri modelli che possono essere utilizzati per affrontare questo tipo di problemi.

Un primo esempio potrebbe essere quello riportato da Patrick Hammer e Martin Mayer nell'articolo che propone un modello di controllo predittivo a parametri distribuiti per sistemi di pastorizzazione a tunnel, (Hammer & Mayer, 2004). Questo tipo di approccio prevede di rappresentare il processo con equazioni differenziali parziali paraboliche, confrontare l'applicazione di algoritmi numerici espliciti e impliciti (schema di Crank Nicolson, (Crank & Nicolson, 1947) o schema di Eulero) per ricevere un modello di spazio degli stati da applicare in un modello di controllo predittivo lineare. I risultati vengono analizzati in relazione all'accuratezza e la stabilità della discretizzazione numerica delle equazioni alle derivate parziali e in relazione ai risultati del controllo e dell'ottimizzazione. Il modello deve tenere in considerazione molti parametri come la velocità del nastro trasportatore, le varie temperature di zona, la temperatura del prodotto in ingresso, la temperatura dell'ambiente e il loro impatto sui parametri di qualità come le unità di pastorizzazione (PU) e il tempo in cui il prodotto deve restare al di sopra della temperatura soglia per il trattamento termico (TAT). L'idea base del lavoro proposto è quella di proporre la divisione del problema in sotto problemi minori, di modellarli separatamente e di collegarli tramite una simulazione con un processo ben strutturato. Per la soluzione numerica viene scelto lo schema implicito di Crank Nicolson che garantisce una maggiore stabilità numerica. Le equazioni alle derivate parziali considerate includono diversi termini additivi: il primo descrive la diffusione del calore tra i prodotti, il secondo descrive l'impatto della temperatura dello spruzzo d'acqua nelle diverse zone sui prodotti posti sul nastro trasportatore. L'equazione 2-49 descrive il problema

$$\frac{\partial T}{\partial t} = D * \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \gamma(u - r_c) \quad 2-49$$

dove:

- T è la temperatura del prodotto
- $\partial x$  è la direzione del nastro trasportatore

- $r_c$  è la temperatura nella zona considerata
- $D$  è il coefficiente di diffusione
- $\gamma$  è guadagno di temperatura della zona

Lo schema di Crank Nicholson, sostiene il lavoro, permette di ottenere risultati più stabili e precisi per intervalli di tempo maggiori rispetto all'approccio euleriano che non garantisce una soluzione numerica alle equazioni alle derivate parziali.

Oltre all'ambiente di simulazione numerica Matlab, è stato preso in considerazione in altre tesi l'utilizzo di altri software per la soluzione del problema numerico. Infatti, il modello ad equazioni differenziali alle derivate parziali può essere implementato anche in un software chiamato COMSOL Multiphysics che è anche in grado di dare una presentazione visiva del processo di pastorizzazione. Nella tesi presentata nel 2006 da Kristina Hoffmann Larsen sulla pastorizzazione a tunnel della birra, (Hoffmann Larsen, 2006), è stato simulato il comportamento di due formati di lattine di birra. Questo software prende in considerazione l'equazione generale di scambio termico con l'equazione di Navier Stokes in condizioni non isoterme.

$$\delta_{ts}\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla(-k\nabla T + \rho c_p \mathbf{u}\nabla T) = Q \quad 2-50$$

dove:

- $T$  è la temperatura del prodotto
- $t$  è il parametro tempo
- $\delta_{ts}$  è il coefficiente di scala del tempo
- $k$  è la conducibilità termica del fluido
- $\rho$  è la densità del fluido
- $c_p$  è il calore specifico del fluido
- $Q$  è il calore fornito dalle docce
- $\mathbf{u}$  è il vettore velocità con componenti  $[u, v]$

I risultati ottenuti permettono di valutare l'influenza della temperatura di doccia sul processo termico sui due modelli di lattine simulate. Sono stati riscontrati anche fenomeni particolari per quanto riguarda le temperature registrate nel dominio di calcolo durante le simulazioni. Questi strani fenomeni sono stati riscontrati anche durante la fase sperimentale

del progetto che ha permesso di aumentare molto la conoscenza del processo termico dato che, in questo modo sono state individuati alcuni fenomeni di particolare interesse.

## **2.6 Modelli numerici per il processo di raffreddamento**

Per quanto riguarda la modellazione numerica del processo termico di raffreddamento si può considerare tale processo come la seconda fase del processo di pastorizzazione descritto in dettaglio nei paragrafi precedenti. Questa fase diventa di grande interesse nella produzione di bevande alimentari come i succhi di frutta, bevande a base di succhi di frutta o nettari. Questi tipi di prodotti vengono imbottigliati con linee di produzione Hot Fil ovvero a caldo. I contenitori utilizzati sono particolari poiché vengono utilizzati quelli costituiti di plastica PET, acronimo di polietilene tereftalato. Questo materiale fa parte della famiglia dei poliesteri ed è una resina termoplastica adatta al contatto alimentare. In funzione dei processi produttivi della storia termica può esistere in forma amorfa (trasparente) o semicristallina (bianca e opaca). Viene utilizzato quindi per queste applicazioni date la buona resistenza chimica e alle ottime prestazioni alle alte temperature, come quelle coinvolte nel processo di riempimento delle linee Hot Fil ( $T > 80^{\circ}\text{C}$ ). Il PET si decompone alla temperatura di  $340^{\circ}\text{C}$ . Anche in questo trattamento termico, di notevole importanza è il coefficiente di scambio termico il quale è notevolmente influenzato dallo spessore del contenitore in PET. Nello studio riportato da Liga e altri nel proprio articolo (Liga, et al., 2016), è stato analizzato il coefficiente di scambio termico per bottiglie di volume pari a 0.5 l ma con due valori di spessori diversi ( $200\mu\text{m}$  e  $300\mu\text{m}$ ) durante una fase del ciclo di raffreddamento. Dato lo schema riportato in Figura 2.7, il coefficiente globale dello scambio di calore può essere calcolato con la formula 2-51.

$$U_g = \left( \frac{1}{h_1} + \frac{\delta}{k} + \frac{1}{h_2} \right)^{-1} \quad 2-51$$

dove:

- $U_g$  è il coefficiente globale di scambio termico
- $h_1$  è il coefficiente di scambio termico all'interno della bottiglia
- $\delta$  è lo spessore della parete di PET
- $k$  è la conduttività termica del PET

- $h_2$  è il coefficiente di scambio termico all'esterno della bottiglia

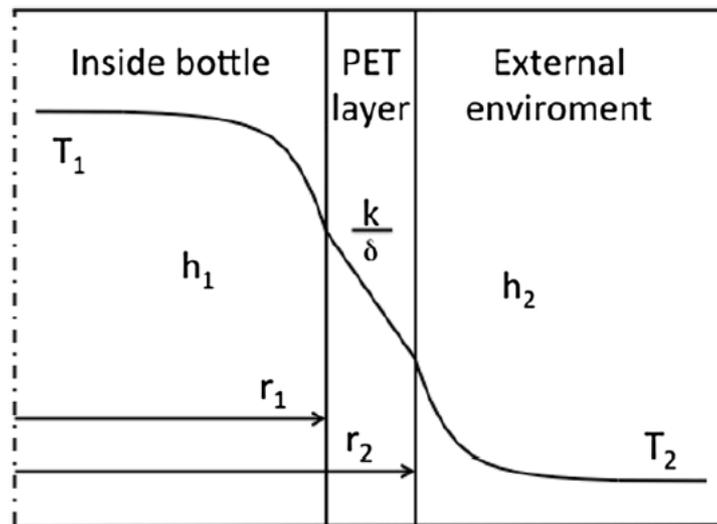


Figura 2.7 Schema dell'andamento della temperatura in funzione degli strati attraversati

Sono state analizzate alcune condizioni di lavoro verificate anche sperimentalmente ovvero raffreddando la bottiglia con diverse procedure. Sono stati confrontati quindi i coefficienti di scambio termico usando due diversi fluidi ovvero raffreddamento statico con aria, raffreddamento statico con acqua e raffreddamento statico con uno spray di acqua. Inoltre, è stata considerata la bottiglia in due posizioni diverse ovvero mettendola verticale e orizzontale. Per la seconda posizione è stata valutata anche la condizione dinamica ovvero che la bottiglia potesse rotolare sul nastro trasportatore. La conclusione principale è che lo spessore del PET del contenitore è il fattore che influenza maggiormente il coefficiente globale di scambio termico. Inoltre, la condizione migliore di scambio termico si ottiene, in condizioni statiche, con lo spray d'acqua con la bottiglia posta verticalmente. In accordo con la letteratura la posizione verticale determina un tempo di raffreddamento più elevato rispetto a quella orizzontale. I test dinamici aggiungo che, con la bottiglia posta orizzontalmente e posta in rotazione con una velocità pari a 200 rpm, il coefficiente di scambio termico globale incrementa di oltre il 200% rispetto alle condizioni classiche di raffreddamento dei succhi di frutta o bevande in generale imbottigliate e sottoposte al processo termico verticalmente. Ciò è determinato dal fatto che la rotazione della bottiglia

da origine ad un processo di scambio di calore diverso dato che si genera una convezione forzata e non naturale all'interno della bottiglia.

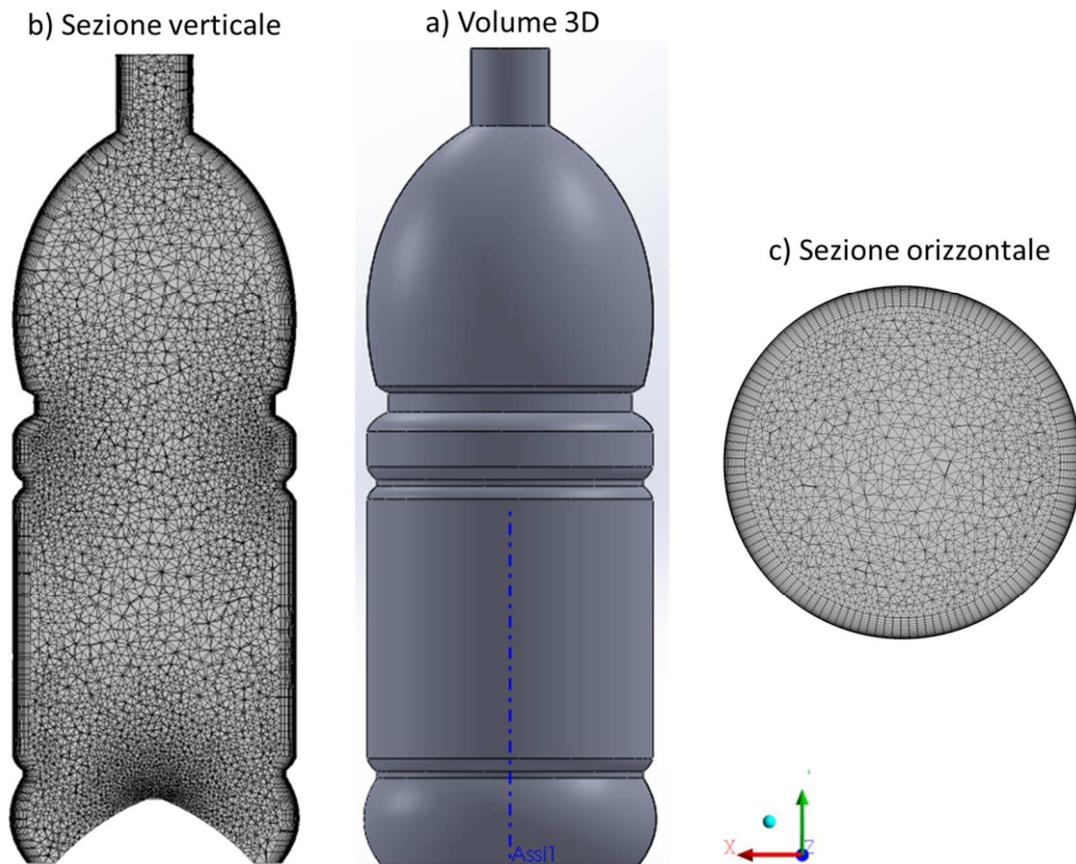
## **2.7 CFD per il raffreddamento di fluidi imbottigliati**

Uno degli approcci numerici al processo termico di raffreddamento che è stato intrapreso riguarda l'utilizzo di modelli tridimensionali analizzati da codici CFD con il software ANSYS CFX 17.0. Il programma risolve la forma tridimensionale e mediata con l'approssimazione di Reynolds dell'equazione di Navier Stokes usando un metodo ai volumi finiti. Il contenitore scelto è uno di quelli che poi verrà utilizzato per la campagna sperimentale. Si tratta di una bottiglia in PET adatto a linea a riempimento caldo del volume di 1200 ml con una sezione circolare come mostrato nella Figura 2.8. A partire dalla geometria della bottiglia è stato ricavato il volume interno costituito dal fluido. All'interno di questo volume è stata creata una mesh ibrida con ASYS ICEM CFD con circa 80000 elementi. Al volume di fluido sono state assegnate le caratteristiche dell'acqua ed in particolar modo sono stati impostati polinomi in funzione della temperatura per densità, equazione 2-52, per la capacità termica specifica, equazione 2-53, e per il coefficiente di dilatazione termica, equazione 2-54.

$$\rho(T) = 193.746616 + 7.135269222 * T - 0.019926047 * T^2 + 0.0000168729 * T^3 \quad 2-52$$

$$c(T) = 46420.5514285946 - 505.39408181459 * T + 2.26707873035 * T^2 - 0.0045222746 * T^3 + 0.000003387707 * T^4 \quad 2-53$$

$$\beta(T) = -0.014877644 + 0.000114314 * T - 0.000000287980277 * T^2 + 0.000000000250737718 * T^3 \quad 2-54$$

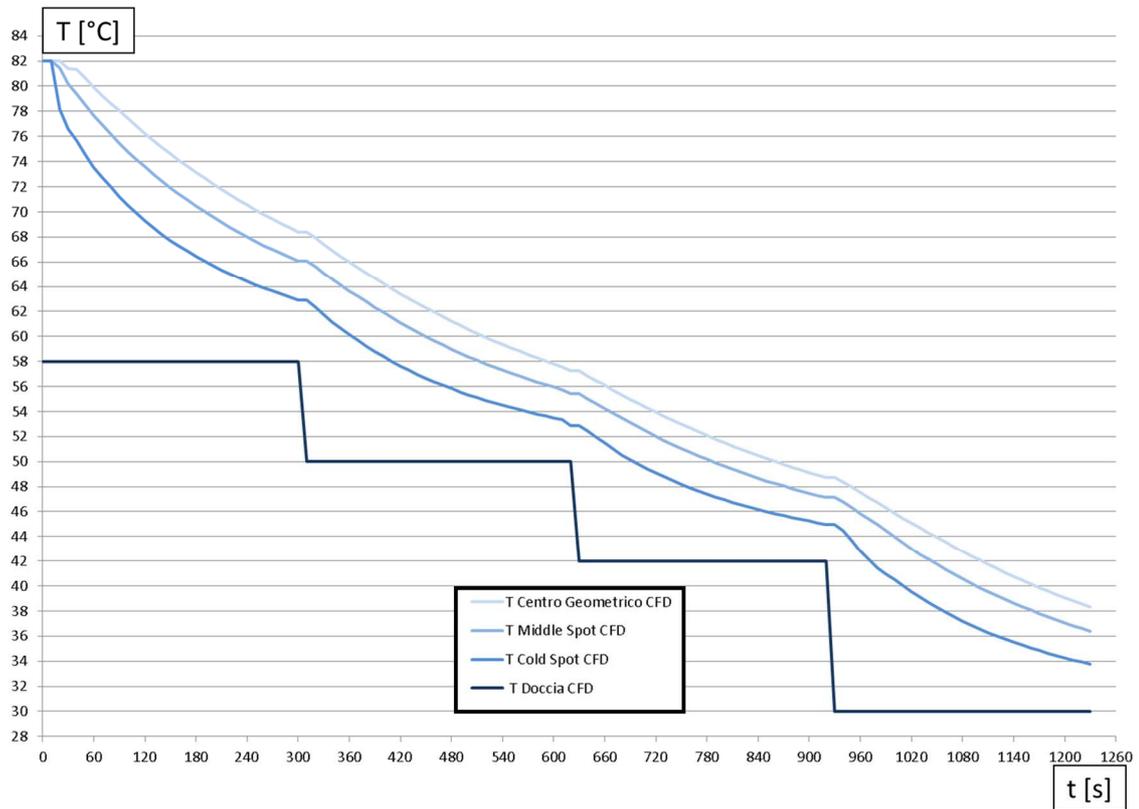


**Figura 2.8** Rappresentazione del a) Volume fluido, e della mesh riportata su b) una sezione verticale e c) una sezione orizzontale

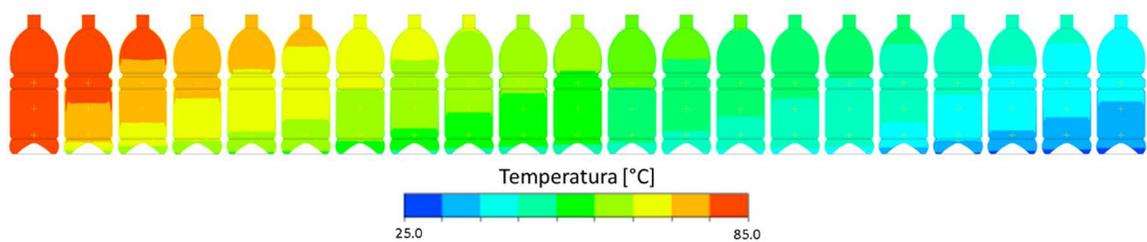
Sono state fatte delle simulazioni numeriche in regime transitorio della durata di 300 secondi con un time step di 0.1 secondi. Ad ogni secondo è stato deciso di salvare le caratteristiche del volume in modo da poter poi post processare i dati. Per poter simulare le condizioni del raffreddamento della bottiglia è stato scelto di far partire il fluido in quiete ad una temperatura di 82°C e per le pareti è stato attivato lo scambio di calore tramite coefficiente impostandolo a 440 W/m<sup>2</sup> K. Inoltre, ogni 300 secondi è stata fatta variare la temperatura esterna simulando la transizione del prodotto attraverso 4 differenti zone di raffreddamento. Sono state scelte le temperature di una applicazione tipica installata in campo e di cui, grazie alla collaborazione con l'azienda Sidel, abbiamo a disposizione informazioni dettagliate. Alla fine delle simulazioni numeriche è stato possibile tenere traccia della storia termica del prodotto. Con il post processo si può ricavare la storia termica del prodotto in qualsiasi punto del volume. Il principale punto di interesse è il Cold Spot che, come descritto in precedenza, rappresenta il punto più lento a reagire in fase di riscaldamento

ma che rappresenta anche il punto più veloce a reagire durante la fase di raffreddamento. Dato che, come vedremo nel capitolo dedicato al raffreddamento dei fluidi alimentari, il punto che viene maggiormente investigato e al quale si fa riferimento per ogni analisi è il centro geometrico del contenitore del prodotto. Daa la distanza tra i due punti presi in esame è stato scelto di riportare le informazioni relative alla temperatura anche in un punto intermedio o middle spot. Le storie termiche dei punti descritti sono state riportate nella Figura 2.9 dove è stata riportata anche la temperatura esterna in questo caso ideale che, nelle applicazioni reali, è determinata dalle docce di zona. Come si può vedere il Cold Spot è il punto a velocità di raffreddamento maggiore e il Centro Geometrico è quello con maggiore inerzia termica.

Data l'assialsimmetria del caso studiato, è stato definito un piano verticale (X Z) e sul quale è stato possibile proiettare la temperatura del campione e le streamline della velocità del fluido dettate dalla convezione naturale all'interno del campione. Come si può vedere dalla Figura 2.10, il processo di raffreddamento all'interno di questi contenitori in PET e con le condizioni al contorno imposte nelle simulazioni numeriche che sono state condotte, il volume di fluido con le caratteristiche dell'acqua parte da una temperatura uniforme di 82 gradi e con il passare del tempo, le immagini fanno riferimento alla distribuzione della temperatura registrata ogni 60 secondi di trattamento termico, il calore viene ceduto prima dagli strati inferiori. Invece, dalla Figura 2.11, che riporta le streamline di velocità del fluido ad intervallo di 10 secondi per il primo minuto della zona di raffreddamento e per ogni minuto nel tempo rimanente di zona, si può notare come avviene il fenomeno di convezione naturale per lo scambio di calore all'interno del volume di fluido analizzato.

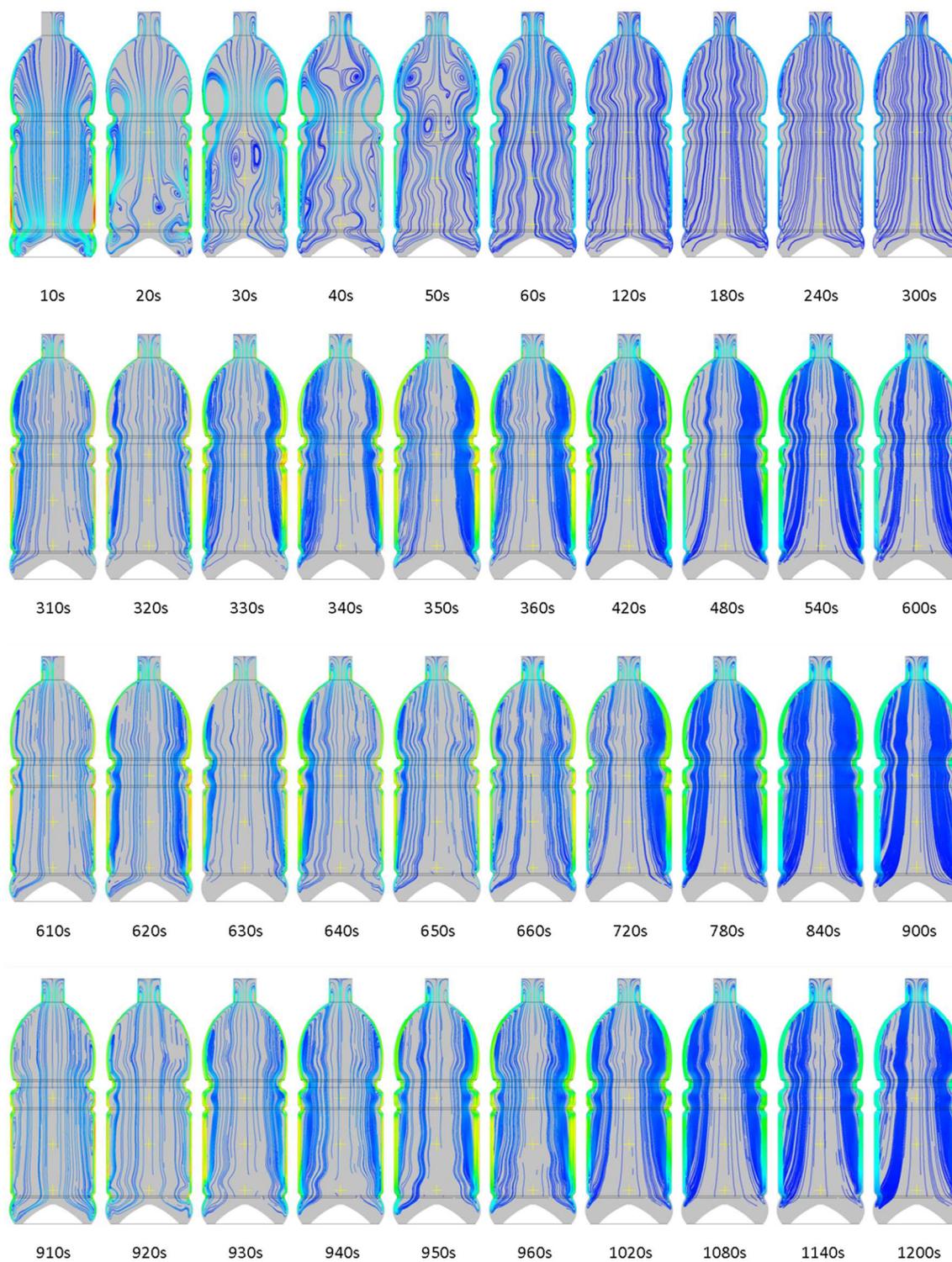


**Figura 2.9 Storia termica del campione durante le simulazioni numerica nei tre punti di interesse (Cold Spot, Centro Geometrico e Punto Intermedio)**



**Figura 2.10 Evoluzione termica del campione con le caratteristiche dell'acqua ogni 60 secondi**

Nei primi istanti del processo di raffreddamento seppur con velocità minime si generano delle celle convettive come quelle previste negli studi presenti in letteratura e descritte nei paragrafi precedenti per il processo di riscaldamento della pastorizzazione. Una volta che le celle convettive sono state attivate il processo di scambio di calore diventa più regolare ed omogeneo durante tutte le restanti zone di raffreddamento.



**Figura 2.11 Streamline della velocità del fluido negli istanti di tempo indicati**

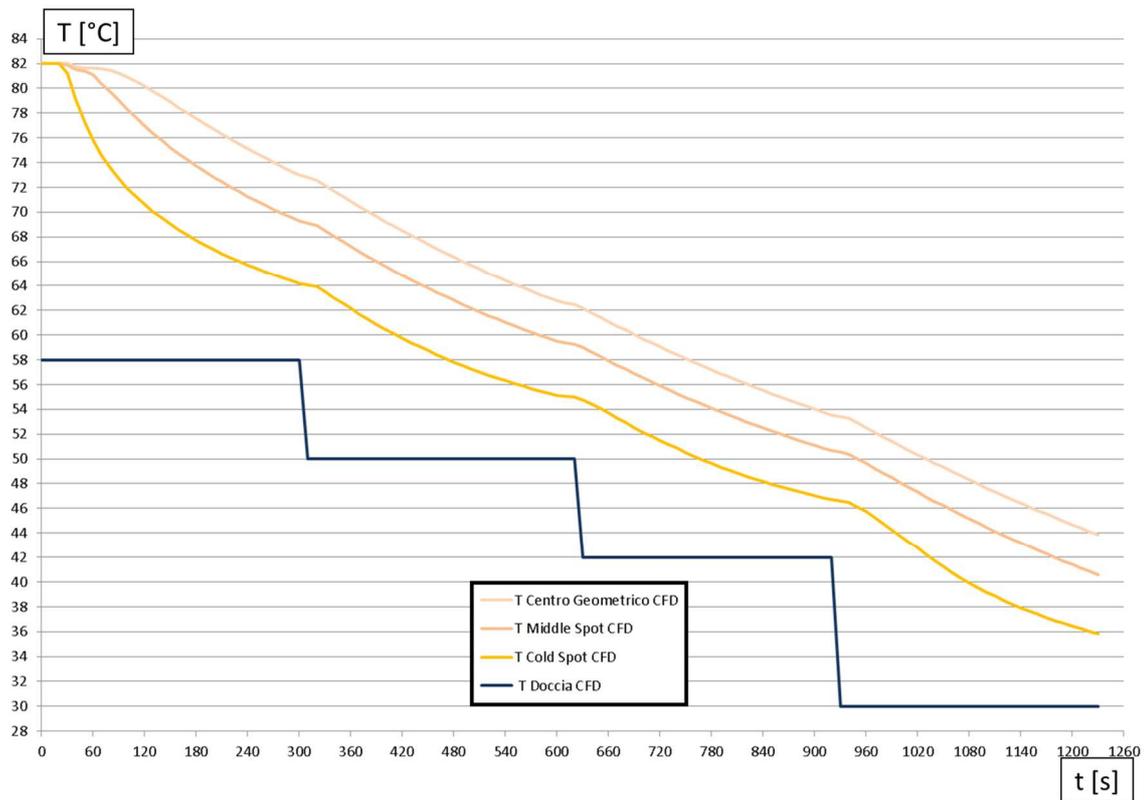
Dato che gli altri fluidi alimentari possono essere considerati delle soluzioni a base acqua di polpa o di estratto di altri frutti, per avere una idea di quello che ci si può aspettare nelle prove sperimentali fatte in luogo è possibile ipotizzare di fare altre simulazioni numeriche con le stesse condizioni descritte in precedenza ma facendo variare alcune caratteristiche fondamentali del fluido considerato. Il parametro che maggiormente influenza lo scambio termico per i fluidi in regime di convezione naturale nelle zone adiacenti alle pareti è la viscosità dinamica. Dato che questa grandezza quantifica la resistenza dei fluidi allo scorrimento sulle superfici viene a rappresentare un nuovo ostacolo allo scambio di calore con l'ambiente esterno. Infatti, questa grandezza rappresenta la resistenza del fluido quando gli viene applicato uno sforzo tangenziale. Tutti i fluidi possono essere quindi caratterizzati in funzione di questa grandezza che sarà sempre legata quindi alla velocità e al tipo di moto con cui il fluido si muove. Verrà poi spiegato nel dettaglio nel capitolo dedicato ai fluidi alimentari, ma per poter avere un'idea di quanto questo fattore possa influire durante un ciclo di raffreddamento analogo a quello precedente ma eseguito su un fluido diverso dall'acqua si è provato a far variare questo parametro, utilizzando un parametro costante durante la simulazione. In realtà il parametro dovrebbe essere calcolato con una equazione in funzione della temperatura come è stato fatto per le altre caratteristiche del fluido descritte in precedenza ma per alleggerire la simulazione numerica e permettere di portare a convergenza i calcoli è stato impostato un parametro costante. Questa approssimazione viene giustificata dal fatto che nel range di temperatura in cui avvengono le simulazioni del ciclo di raffreddamento la variazione della velocità di taglio, da cui dipende la viscosità dinamica secondo l'equazione 2-55, è minima.

$$\mu = \tau * \frac{\partial y}{\partial u} \quad 2-55$$

Assumendo quindi un valore di viscosità dinamica di 0.02 [Pa s] in accordo con la curva caratteristica di questa grandezza in funzione della velocità di taglio, sono state condotte delle simulazioni analoghe con le stesse condizioni al contorno.

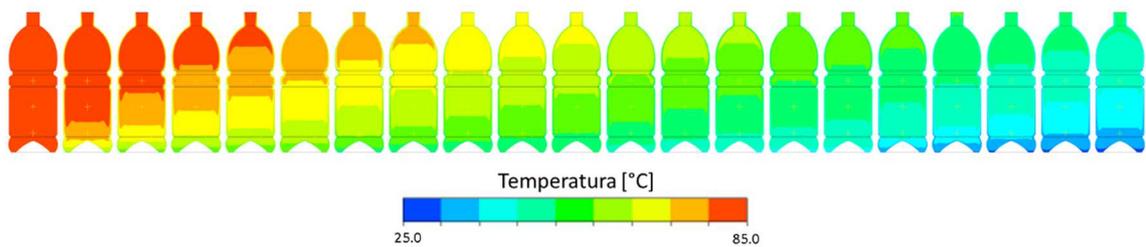
Nella Figura 2.12 è riportata la storia termica del campione con le caratteristiche sopradescritte durante le 4 fasi di raffreddamento nei 3 punti di interesse ovvero il Cold Spot, il Centro Geometrico della bottiglia e il punto intermedio tra i due. Inoltre, è stata riportata anche la temperatura esterna in questo caso ideale che, nelle applicazioni reali, è determinata

dalle docce di zona. Anche in questo caso, il Cold Spot è il punto a velocità di raffreddamento maggiore e il Centro Geometrico è quello con maggiore inerzia termica.



**Figura 2.12 Storia termica del campione con le caratteristiche del succo di frutta al gusto di mango durante le simulazioni numerica nei tre punti di interesse (Cold Spot, Centro Geometrico e Punto Intermedio)**

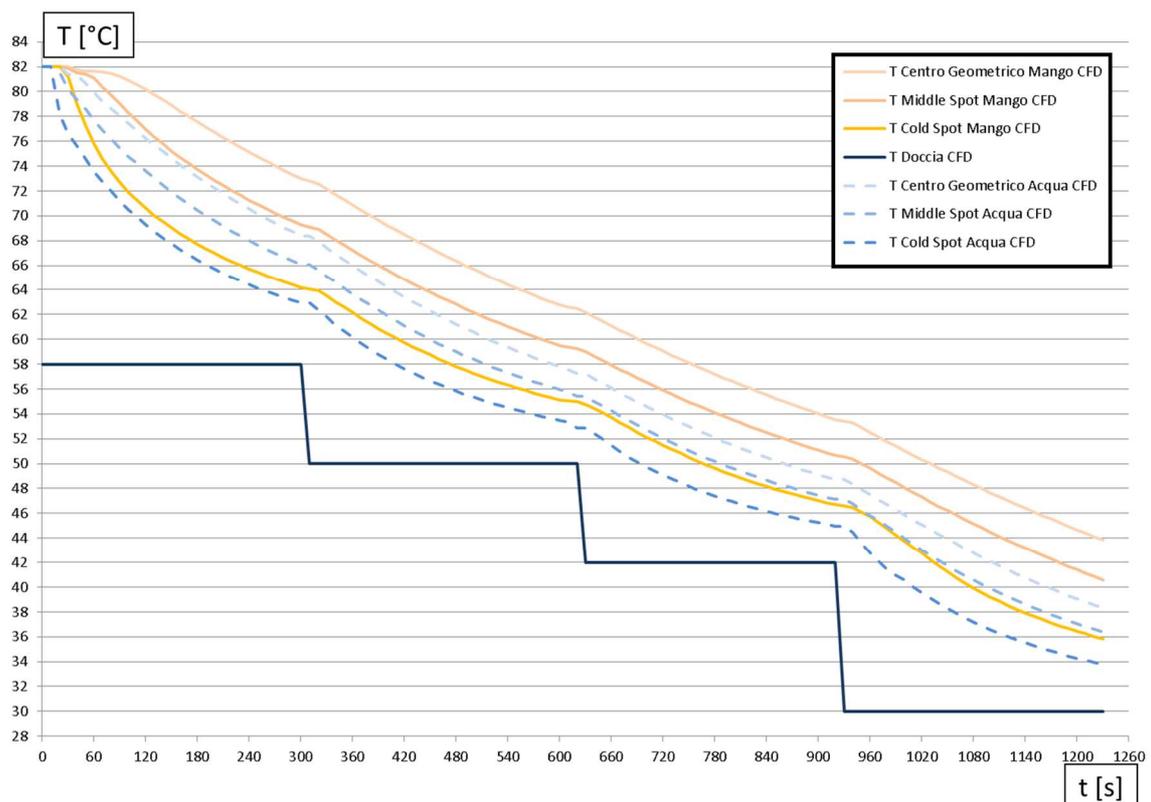
Si ottiene una evoluzione termica molto simile a quella ottenuta considerando che il volume fosse occupato da un fluido con tutte le caratteristiche fisiche dell'acqua, Figura 2.13.



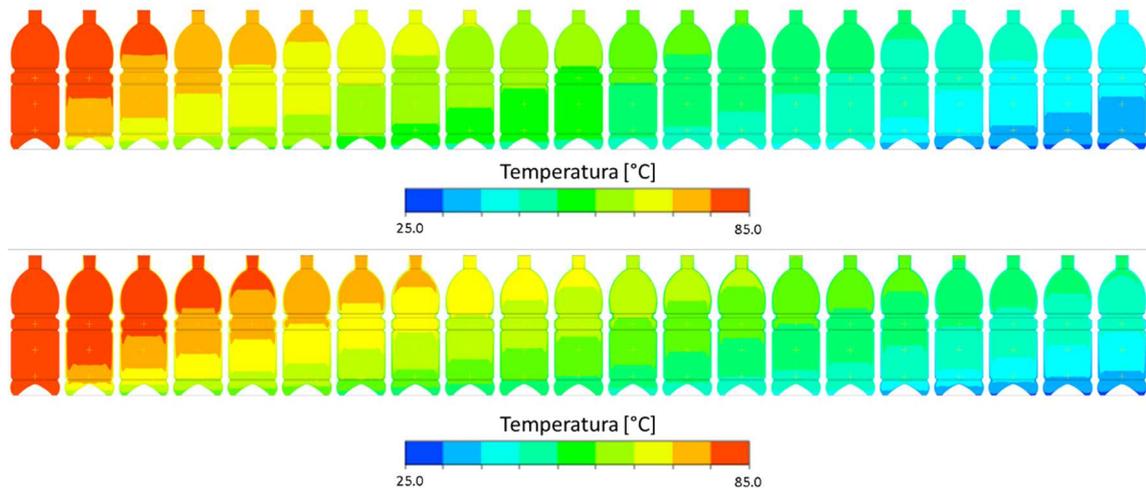
**Figura 2.13 Evoluzione termica del campione con le caratteristiche del succo di frutta al gusto di mango ogni 60 secondi**

Mettendo a confronto i due trend, Figura 2.14 e Figura 2.15, si può notare come il comportamento dei due campioni sia simile da un punto di vista della storia e dell'evoluzione termica a meno di un ritardo che, con l'aumentare del tempo di trattamento termico fa divergere maggiormente i trend di temperatura rilevati nei tre punti caratteristici (Cold spot, Centro geometrico e il punto intermedio). Il confronto tra le storie termiche è stato realizzato mettendo in tratteggio gli andamenti relativi al fluido con tutte le caratteristiche dell'acqua. Per quanto riguarda l'evoluzione termica si può notare lo stesso ritardo messo in evidenza dai trend dato che la zona a temperatura minore nell'ultima sezione è meno sviluppata.

I risultati ottenuti dalle simulazioni numeriche, per quanto riguarda i processi termici, sono utili per capire che una minima variazione delle caratteristiche fisiche del fluido può comportare processi di scambio termico differenti. Infatti, come è stato descritto, si possono ottenere risultati molto diversi in termini di tempo necessario per lo scambio termico voluto con l'obiettivo di ottenere la temperatura desiderata alla fine del trattamento termico.



**Figura 2.14** Confronto tra la storia termica del campione con le caratteristiche dell'acqua e l'evoluzione termica del campione con le caratteristiche del succo di frutta al gusto di mango



**Figura 2.15** Confronto tra l'evoluzione termica del campione con le caratteristiche dell'acqua e l'evoluzione termica del campione con le caratteristiche del succo di frutta al gusto di mango ogni 60 secondi

# Capitolo 3

## Banco Prova Sperimentale per ciclo di Pastorizzazione e Raffreddamento

### 3.1 Studio del problema

Per poter analizzare e comprendere il comportamento dei prodotti sottoposti al processo di pastorizzazione o di raffreddamento è stato necessario costruire un banco prova dedicato. Presso i laboratori della SIDA di Verona di Sidel è stato studiato ed assemblato un modulo utile a questo tipo di ricerca. L'obiettivo principale è stato quello di determinare la storia termica dei prodotti che vengono sottoposti a cicli di pastorizzazione in ambito industriale. Uno dei prodotti più diffusi che deve essere sottoposto a tale trattamento termico è la birra già imbottigliata che può essere contenuta in bottiglie di vetro con diversi volumi (i valori classici sono 330 ml e 660 ml) e in lattine di alluminio con diversi volumi (i valori classici sono 330 ml e 500 ml). Data la grande esperienza in questo settore lo studio dei prodotti e la loro storia termica all'interno del banco prova è partito da tale fluido. Consolidata la procedura e utilizzando a pieno le potenzialità di tale banco prova sono stati poi studiati altri fluidi di natura diversa ma sempre dell'ambito alimentare come i succhi di frutta la cui base di partenza era: pera, pesca, albicocca, arancia, mandarino, mango, banana, papaya, ananas, mela solo per citarne alcuni, Figura 3.1.

Per poter eseguire la studio di tali prodotti è stato quindi necessario ricostruire in scala un modulo di una macchina a tunnel per la pastorizzazione ovvero l'applicazione industriale più diffusa per questo tipo di produzione. Si tratta di una serie di moduli assemblati per una lunghezza totale che supera i venti metri e che hanno una sezione di ingresso di almeno cinque metri. Come detto, sono macchine con applicazione in linea all'interno di soluzioni industriali e le installazioni sono sparse in tutto il mondo. Sarebbe stato quindi improbabile utilizzare direttamente un impianto funzionante per poter condurre una campagna sperimentale articolata come quella che è stata poi condotta. Il modulo che si è deciso di costruire presso il laboratorio doveva quindi essere in grado di riprodurre tutte le varie condizioni che potevano verificarsi via via lungo il tunnel che sottopone il prodotto al ciclo termico di pastorizzazione.



**Figura 3.1 Prodotti analizzati grazie al banco prova: birra in bottiglie di vetro e lattine, succhi di frutta con diversi frutti come base**

### **3.2 Approssimazioni necessarie e caratteristiche essenziali per la realizzazione del banco prova**

La prima approssimazione fatta riguarda il tappeto mobile. Ovviamente per il trasporto nelle applicazioni industriale il prodotto viene caricato su un nastro trasportatore mobile formato da una griglia in plastica. Questo viene trascinato attraverso le zone da opportuni motori elettrici e motoriduttori che, in base al tempo necessario al prodotto per poter raggiungere la temperatura di progetto, regolano la velocità. Pensare di montare tutto l'apparato che regola il movimento di tale nastro in un modulo della macchina per il

laboratorio sarebbe stato eccessivamente complicato e costoso. Si è deciso quindi di installare una parte della griglia che funziona da piano di appoggio ma di renderla fissa. In questo modo, i vari test saranno condotti con i contenitori fermi e non in movimento come accade nelle applicazioni in campo.

Dato che il modulo di macchina da costruire doveva rendere gli studi più generali possibili e dato che la maggior parte delle applicazioni industriali sono a doppio piano di trasporto del prodotto, si è deciso di realizzare il modulo in modo tale che fossero presenti due camere per i test. Si tratta di due vani sovrapposti in modo tale da poter simulare il funzionamento delle macchine industriali denominate “double deck”. Entrambe le camere inoltre sono state realizzate in modo tale da ospitare le tubature e gli ugelli necessari per ottenere le piogge necessarie per sottoporre il prodotto al ciclo termico di pastorizzazione. Si tratta di una sperimentazione necessaria per poterne andare a valutare una futura applicazione dato che al momento tutte le soluzioni industriali delle macchine a tunnel double deck hanno tubature ed ugelli installati solo sul tetto della camera superiore. Infatti, dato che il nastro trasportatore è realizzato con una catena a maglie in plastica, l’acqua erogata dagli ugelli al piano superiore scambia calore con il prodotto una prima volta ma poi, attraversando la catena, scende e va a scambiare calore anche con il prodotto nella camera inferiore. Ugualmente, il piano di appoggio del vano inferiore sarà realizzato con la stessa catena perché così l’acqua la potrà attraversare e potrà essere raccolta e convogliata, tramite opportune valvole e tubazioni, nella vasca di raccolta mantenuta alla temperatura di progetto. Nel caso si voglia verificare il funzionamento della macchina a singolo piano, chiamata “single deck” in campo industriale, sarà quindi possibile utilizzare una delle due camere in funzione di quali ugelli vengono attivati ed utilizzati durante la fase di erogazione dell’acqua.

Per poter avere accesso ai ripiani e sistemare i campioni del prodotto da sottoporre a test le zone di ingresso e uscita del modulo sono state simulate posizionando delle porte rimovibili in plexiglas. Questa scelta è stata dettata da diversi fattori. Le pareti che sostengono le tubature con gli ugelli per l’erogazione dell’acqua sono per necessità di acciaio. Le altre, dovendo essere rimovibili per poter avere accesso alla camera, dovevano essere comode e in acciaio sarebbero state anche troppo pesanti. Si è quindi deciso di realizzarle in plexiglas che garantiva una buona tenuta essendo infrangibile e permetteva inoltre una visuale diretta di ciò che accadeva dentro la camera prova. Anche se le temperature dell’acqua erogata dagli

ugelli sono elevate, dato il comportamento plastico tipiche del materiale, le porte laterali si possono quindi deformare ma garantire al tempo stesso la tenuta della camera.

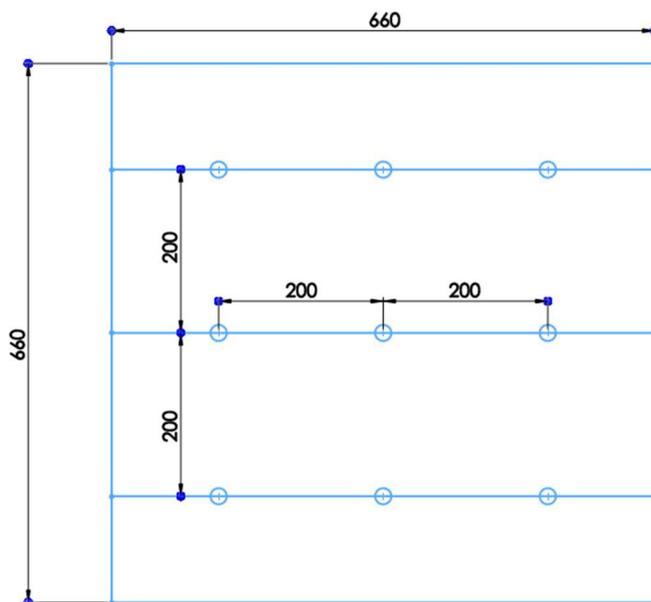
Di seguito, nella Figura 3.2, viene riportata l'immagine del layout finale del banco prova. Si tratta della realizzazione del progetto dopo aver considerato tutta una serie di possibili fattori che potrebbero compromettere la buona riuscita dei vari test ma anche la possibilità di poter agire su tutte le variabili possibili che regolano il comportamento dell'intera macchina come la portata di ingresso dell'acqua, la sua temperatura, la durata di una determinata fase, la pressione agli ugelli, il tipo di pattern in quella zona ovvero la combinazione passo tubi e passo ugelli, la tipologia di ugelli ( a cono pieno, a cono vuoto, ugelli particolari da installare al limite tra una zona di pastorizzazione e l'altra) e, ovviamente, poter registrare la temperatura interna dei campioni posti nelle camere di prova. Di seguito verranno riportate tutte le scelte fatte per poter eseguire i molti test possibili modificando tutte le variabili riportate in precedenza.



**Figura 3.2 Layout banco prova**

### **3.3 Dimensionamento piano di appoggio**

Partendo dalla configurazione attuale della macchina, la minima misura per la quale il piano del banco prova risulti significativo è 660 mm. Per semplicità la camera è stata realizzata a sezione quadrata quindi di 660 mm per 660 mm. Per arrivare a questa misura si è partiti dalle caratteristiche degli ugelli utilizzati per erogare l'acqua. Nelle applicazioni industriali il passo ugelli, ovvero la distanza tra due ugelli montati sullo stesso tubo, e il passo tubi, ovvero la distanza tra due tubi porta ugelli consecutivi, sono di 200 mm. Centrando un ugello con il punto intermedio del banco prova a sezione quadrata, in modo tale che i campioni in quella posizione siano investiti dalla stessa pioggia che subirebbero in una applicazione industriale, si possono ricavare anche le altre misure, vedi schema in Figura 3.3. Inoltre, con questa configurazione, i campioni posti al centro della camera non rischiano di essere investiti da una pioggia superiore da quella voluta. Infatti, se la camera di prova fosse troppo piccola, le piogge potrebbero sbattere contro le pareti laterali ed essere riflesse verso il centro. Questo fenomeno potrebbe andare a modificare completamente i possibili risultati dei vari test e si potrebbero quindi ricavare informazioni non corrette.



**Figura 3.3 Schema di partenza camera banco prova**

Gli ugelli, siano essi a cono pieno o a cono vuoto, generano un cono d'acqua che investe il prodotto. La configurazione 200 mm per 200 mm, ovvero passo tubi e passo ugelli, permette di garantire una intersezione dei vari coni d'acqua in modo tale da assicurare una

completa copertura del prodotto. Ovviamente, questo dipende dall'altezza del prodotto e dalla distanza del piano di appoggio dai tubi porta ugelli. Per poter verificare delle possibili variazioni di prestazioni della macchina, all'interno delle camere prova i piani di appoggio sono montati su sostegni che permettono di essere fissati a diverse altezze. La configurazione standard prevede che l'altezza sia 410 mm. Queste permette di studiare sia i formati classici che i formati maggiori (2 litri) in cui si possono presentare altri possibili prodotti che possono subire il trattamento termico di pastorizzazione o più semplicemente di raffreddamento post riempimento. Dalla Figura 3.4 si può vedere uno schema dei vari prodotti all'interno di una delle camere durante un probabile test e una ipotesi dei coni di acqua generati dagli ugelli. L'angolo di apertura degli ugelli è di 90 gradi come viene garantito dal produttore nel caso in cui l'ugello sia alimentato correttamente e che lavori in condizioni ottimali. Si può notare come l'intersezione sia superiore alla altezza massima delle varie bottiglie o delle lattine.

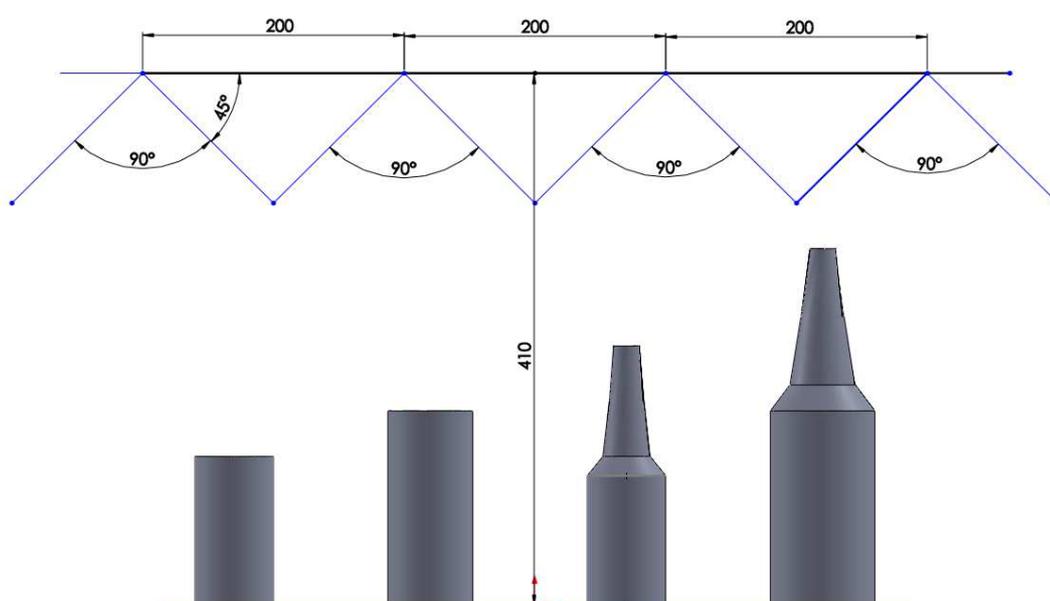


Figura 3.4 Lattine (330ml 500ml) e bottiglie (330 ml 660 ml) all'interno della camera di prova

### **3.4 Impianto idrico banco prova**

Dato che il fluido principale che permette di ottenere lo scambio termico all'interno della camera e di far avvenire il processo termico di pastorizzazione è l'acqua, bisogna cercare di dimensionare in modo adeguato l'impianto idrico del banco prova.

Il parametro principale e da cui si parte per la progettazione di macchine a tunnel per la pastorizzazione è la portata specifica. Si tratta infatti del valore che garantisce lo scambio termico e per il quale la misura delle UP per la birra a fine ciclo permette di rendere commercializzabile il prodotto. La portata specifica viene espressa in metri cubi ora su metro quadro poiché, come detto, le dimensioni delle macchine a tunnel industriali sono molto elevate, indicativamente 30 m di lunghezza per 6 m alla sezione di ingresso, il che vuol dire 180 m<sup>2</sup> di superficie bagnata dalle docce. Moltiplicando il valore della portata specifica storicamente utilizzata nelle applicazioni industriali per la superficie di progetto calcolata della camera di prova si ottiene il valore della portata che le pompe dovranno elaborare per poter alimentare i tubi porta ugelli durante i test. Nella Tabella 3.1 sono stati riportati i vari calcoli.

**Tabella 3.1 Serie di calcoli per il dimensionamento dell'impianto idrico del banco prova**

$Q_{spe} = 21.0 \left[ \frac{m^3}{h \cdot m^2} \right]$
$Q = Q_{spe} * A = 21.0 \left[ \frac{m^3}{h \cdot m^2} \right] * (0.66 [m])^2 = 9.15 \left[ \frac{m^3}{h} \right] = 152.5 \left[ \frac{l}{min} \right]$

Con questa portata i 9 ugelli presenti nelle camere prova vanno a lavorare alla pressione di progetto per la quale garantiscono la formazione del cono di acqua. In funzione del modello installato si può ricavare il valore di pressione ottimale e, in seguito, verificarlo tramite i sensori installati nei rispettivi tubi porta ugello. Per poter ricavare questo parametro bisogna utilizzare le curve caratteristiche specifiche di ogni modello di ugello fornite dai produttori.

Tutto l'impianto viene alimentato da acqua che deve essere alla temperatura richiesta dalla zona corrispettiva all'interno del ciclo termico di pastorizzazione. Per averne la quantità necessaria sono state scelte cinque vasche indipendenti di volume di circa mezzo metro cubo, ovvero 500 litri d'acqua. Tutte sono collegate alla rete idrica e ad ogni accensione del banco prova devono essere riempite oltre al livello minimo impostato. Infatti, per poter garantire che l'acqua venga scaldata e mantenuta alla giusta temperatura, non si utilizza un sistema di riscaldamento a vapore come quello che viene utilizzato nelle

applicazioni industriali, data l'efficienza e la capacità di elaborare grandi quantità di volume di acqua, ma è stato scelto di inserire delle resistenze di riscaldamento ad immersione per ogni vasca, Figura 3.5. Si tratta di resistenze che utilizzano 4 kW ciascuna e permettono, grazie al loro funzionamento, di riscaldare e mantenere in temperatura la quantità di acqua necessaria per svolgere ogni tipo di test. Per poter essere in grado di mantenere costanti le alte temperature in gioco durante lo svolgimento dei test, è stato scelto di installare ben sette resistenze a riscaldamento da 4 kW per ogni vasca per un totale di 28 kW assorbiti nel caso in cui debbano lavorare tutte contemporaneamente. Per poter far lavorare più vasche allo stesso tempo, come può essere richiesto durante alcuni test per la verifica di particolari situazioni, serve avere una linea elettrica dedicata che non sia quella della rete elettrica standard. La potenza richiesta è stata stimata considerando: la potenza necessaria a scalare l'acqua nella vasca e tutte le dispersioni legate, dato che la vasca è in metallo e scambierà calore con l'ambiente circostante; la potenza dissipata nei possibili rami di tubi che collegheranno la vasca alla camera, dato che anche questi saranno in acciaio; la potenza dissipata per mantenere tutta la camera di prova alla temperatura voluta dato che questa scambierà calore con l'ambiente circostante; la potenza ceduta durante il test al prodotto ipotizzando di immettere una quantità di prodotto utile a riprodurre condizioni reali del processo industriale. Il tutto è stato calcolato imponendo la temperatura massima di trattamento utilizzata in campo industriale, ovvero 85°C, una temperatura ambiente media di 18°C sulla base delle rilevazioni fatte sui vari impianti dislocati tra i vari continenti in cui sono installate le macchine a tunnel e una portata massima, ma difficilmente utilizzabile, di 30 m<sup>3</sup>/h. Sono stati quindi considerati densità, calore specifico, viscosità dinamica, conducibilità termica e coefficiente di dilatazione termica dei fluidi aria e acqua e dell'acciaio. È stata inoltre considerata sia la convezione interna che esterna per i tubi e per le camere di prova. La somma totale di tutte le potenze dissipate ha dato l'ordine di grandezza necessario per garantire il mantenimento della temperatura stabile e quindi il numero e la potenza delle resistenze da riscaldamento da installare nel banco prova.



**Figura 3.5 Resistenza da riscaldamento ad immersione**

Ipotizzando quindi un primo layout del banco prova, si è riusciti ad avere una idea preliminare della sistemazione delle camere e delle vasche ma soprattutto delle tubazioni necessarie per collegarle: un ramo che porta l'acqua dalla vasca al collettore a cui sono collegati i tubi porta ugelli e un ramo che dal convogliatore, posto al di sotto delle camere di prova e che raccoglie l'acqua che viene spruzzata durante il test, riporta l'acqua all'interno della vasca da cui è stata prelevata. Con queste informazioni è stato possibile ricavare un valore di prevalenza alla quale la pompa che sarà installata dovrà soddisfare per fare in modo che i test vengano eseguiti correttamente. Sono state quindi stimate tutte le possibili perdite di carico presenti nell'impianto: quelle distribuite nei tratti di tubatura rettilinea, quelle concentrate delle varie curve da 90° o da 45°, dei vari convergenti o divergenti, dei vari giunti, delle valvole, dei collettori, del numero di tubi porta ugelli e del numero di ugelli. Inoltre, un contributo importante sulla scelta della pompa è rappresentato dalla differenza di quota tra gli ugelli e il livello del pelo libero in vasca. Avendo quindi a disposizione i valori di portata e di prevalenza da installare è stata poi scelta la pompa adeguata al banco prova per ognuna delle cinque vasche prendendole dal catalogo della marca che solitamente vengono installate nelle macchine a tunnel di applicazione industriale.

Dato che il banco deve avere la possibilità di lavorare anche in condizioni diverse da quelle già consolidate delle applicazioni industriali, per la prima vasca è stata aggiunta una pompa ausiliaria in parallelo a quella già installata. Questa fornisce due servizi: ha la funzione di sofferire ad un probabile guasto della pompa principale permettendo quindi di affrontare la situazione di emergenza; può inoltre fornire una portata maggiore nel caso in cui all'interno della camera vengano installati ugelli sperimentali che necessitino di una portata maggiore a quella che garantisce una sola pompa oppure nel caso in cui vengano sperimentate configurazioni delle camere particolari come quella in cui l'acqua viene erogata da ugelli montati sia nella camera superiore che in quella inferiore.

Tutti i collegamenti dei vari tratti di tubi dei numerosi circuiti che collegano le vasche con le camere di prova saranno realizzati tramite giunti a manicotto comunemente chiamati con il nome della principale produttrice di questo componente ovvero Straub, vedi Figura 3.6. Questi giunti permettono di realizzare collegamenti perfettamente a tenuta se serrati adeguatamente con una chiave dinamometrica e con la giusta coppia ma, allo stesso tempo, permettono di avere un collegamento facile da smontare nel caso in cui sia necessario cambiare la configurazione del banco prova. Infatti, nel caso si voglia cambiare il pattern degli ugelli all'interno delle camere di prova per poter eseguire test comparativi di prestazioni, possono essere realizzati diversi collettori da dover installare. Allentando delle semplici viti e sostituendo i collettori risulta possibile e facile cambiare velocemente la configurazione della camera.



**Figura 3.6 Giunto a manicotto o giunto Straub**

Tutte le vasche sono munite di una valvola di scarico posizionata sul fondo che permette svuotare l'acqua nella rete fognaria nel caso in cui si debba cambiare quella presente nella vasca o nel caso in cui sia stata contaminata da eventuali problemi verificatisi nelle camere di prova con i campioni sottoposti al test. Per evitare anche che il livello in vasca superi la quota alla quale scarica il tubo che riporta l'acqua dal convogliatore posto sotto le camere di prova, ogni vasca è stata munita di scarico di troppo pieno. I vari livelli vengono monitorati da opportuni sensori che riportano tutte le informazioni al PLC il quale raccoglie le informazioni e, azionando le valvole che permettono l'erogazione dell'acqua di rete, mantiene il livello sempre al di sopra di quello minimo. Questo è definito dalla quota a cui sono installate le resistenze da riscaldamento che, se dovessero lavorare in assenza del fluido, potrebbero correre il rischio di superare la loro temperatura massima e incorrere in probabili rotture.

### **3.5 Sistema di misura Banco Prova**

Per avere la possibilità di analizzare l'effetto delle singole variabili sul risultato finale del trattamento termico di pastorizzazione riprodotto all'interno delle camere di prova del banco prova risulta necessario installare tutti i dispositivi utili a misurare le variazioni e le regolazioni che si possono fare sul sistema. Le variabili da misurare principali sono:

- la portata di acqua che viene erogata in camera durante il test
- la temperatura dell'acqua dentro le cinque vasche
- la temperatura all'interno dei campioni inseriti nelle due camere di prova
- la pressione alla quale viene erogata l'acqua dagli ugelli
- il livello dell'acqua dentro le cinque vasche

Per ognuna di questa variabile è stata valutata la soluzione migliore da installare sul banco prova per poter avere sempre le informazioni a disposizione durante i test.

#### **3.5.1 Misure di Portata**

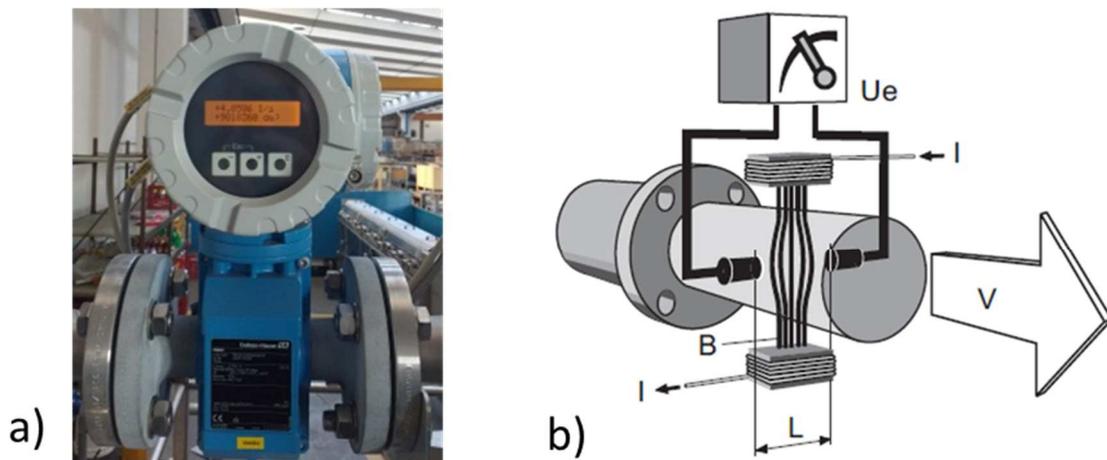
La prima variabile utilizzata per il dimensionamento della macchina è la portata perciò la sua misura è di fondamentale importanza. Per poterlo fare sono stati installati sul banco prova, poco prima dell'ingresso dell'acqua nel collettore che contiene i raccordi per i vari tubi porta ugelli, due misuratori di portata elettromagnetici Proline Promag 50P come quello riportato in figura 3.7. Si tratta di misuratori di portata elettromagnetici per misure bidirezionali di liquidi con una conduttività minima di 5  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Per poter effettuare la misura, in accordo con la legge dell'induzione magnetica di Faraday, viene indotta una tensione in un materiale conduttore che passa attraverso un campo magnetico. Nel principio di misurazione elettromagnetica, il fluido che scorre è il conduttore mobile. La tensione indotta è proporzionale alla velocità del flusso e viene fornita all'amplificatore mediante due elettrodi di misurazione. Il volume del flusso viene calcolato mediante l'area della sezione trasversale del tubo. Il campo magnetico CC viene creato attraverso una corrente continua con polarità alternata. Perciò, come descritto nello schema di Figura 3.7, con la tensione indotta  $U_e$  si può ricavare la velocità del flusso  $v$  dato che sono legati dalla formula 3-1

$$U_e = B * L * v \quad 3-1$$

dove:  $B$  è il campo magnetico e  $L$  è la distanza dagli elettrodi. Ricavando  $v$  e moltiplicando il valore ottenuto per l'area della sezione del tubo  $A$  si ottiene il valore della portata volumetrica  $Q$ , formula 3-2.

$$Q = A * v \quad 3-2$$

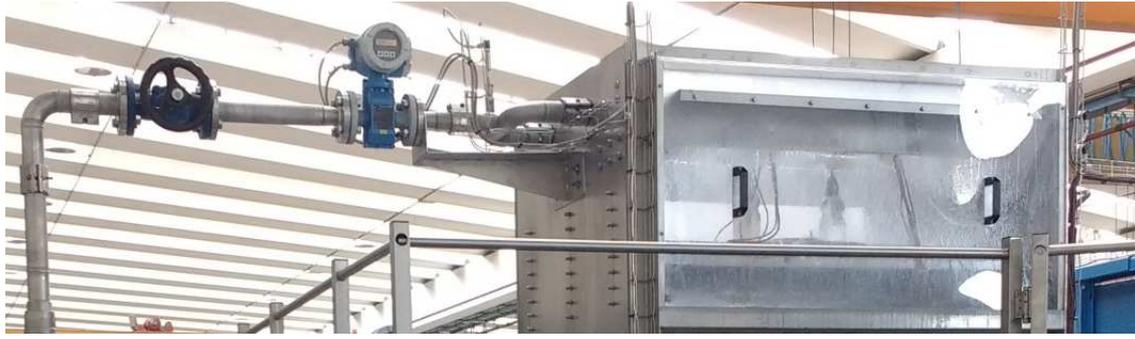
Nello schema viene anche riportata l'intensità della corrente  $I$  che determina il campo magnetico.



**Figura 3.7 a) Misuratore di portata elettromagnetico e b) funzionamento teorico**

Questo strumento permette di misurare un flusso con portata fino a 9600 m<sup>3</sup>/h di un fluido con temperatura che può arrivare ai 180°C. La massima pressione di processo per la misura è di 40 bar. La misura viene riportata a schermo per una lettura diretta e una verifica immediata ma, con gli opportuni collegamenti, viene acquisita dal PLC che gestisce tutto il banco prova e registrata nel file di testo che riporta tutte le grandezze acquisite durante i vari test.

Per poter far variare il parametro della portata di acqua da erogare nella camera di prova durante i test è stata inserita una valvola a saracinesca nel circuito che porta il fluido al collettore, Figura 3.8. Chiudendo o aprendo la valvola si ha la possibilità di regolare manualmente la portata leggendola nel monitor del misuratore elettromagnetico posto in serie lungo il tubo.



**Figura 3.8 Regolazione portata nella camera di prova tramite valvola a saracinesca**

### **3.5.2 Misure di Temperatura**

L'altro parametro legato all'acqua erogata nelle camere di prova durante i test è la sua temperatura. Questo parametro viene misurato due volte: la prima volta quando l'acqua viene mantenuta nelle rispettive cinque vasche, in modo tale da poter fissare il valore prima di iniziare i test, e una seconda volta poco prima che l'acqua venga immessa nel collettore che la porta nei vari tubi porta ugelli. Entrambi le misure vengono fatte con dei termometri compatti Pt 100 Classe A con trasmettitore integrato 4 a 20 mA Easytemp TMR31, Figura 3.9. Questi hanno un campo di misura che va da  $-50^{\circ}\text{C}$  a  $150^{\circ}\text{C}$ . La misura viene letta e riportata al monitor del PLC inoltre viene riportata nel file di testo che viene compilato durante tutti i test che vengono condotti con il banco prova. L'errore massimo misurato in  $^{\circ}\text{C}$  è relativo al valore assoluto della temperatura in  $^{\circ}\text{C}$  ed è espresso dalla formula 3-3.

$$Err = 0.15 + 0.002 * |T| \quad 3-3$$

Alla temperatura ambiente, ad esempio, l'errore di misura equivale a  $0.2^{\circ}\text{C}$ , un valore più che accettabile per il tipo di test che si vuole condurre con il banco prova.

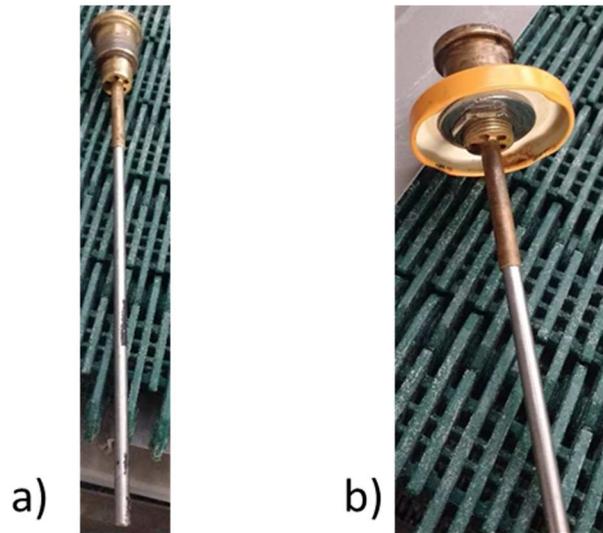


**Figura 3.9 Termometro compatto Easytemp TMR 31**

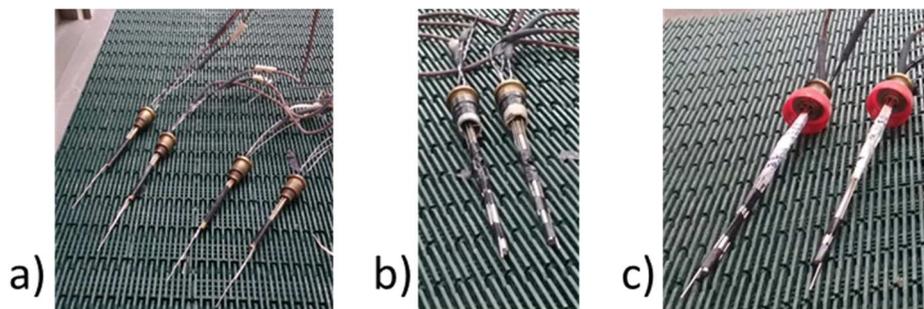
La prima misura viene fatta installando un termometro in una sezione del tubo di by pass di ciascuna delle cinque vasche. In questo circuito l'acqua scorre mentre non viene erogata nelle camere ma le vasche sono in fase di attesa. Le pompe, se la vasca è inserita nella sequenza della procedura del test, sono sempre accese in modo che possano svolgere il loro lavoro non appena il PLC lo comandi. Nel file di testo finale del test questa temperatura sarà definita come TV [°C] con pedice il numero della corrispettiva vasca. La seconda misura viene fatta installando un termometro nella sezione del condotto che porta l'acqua alla camera di prova situata appena prima che questo entri nel collettore il quale distribuisce il fluido nei vari tubi porta ugelli. In questo caso quindi la misura permette di avere un valore che corrisponde a quello delle piogge prodotte nelle camere di prove. Nel file di testo finale del test questa temperatura sarà definita come TD [°C]. Quella del piano superiore prende il nome di TDS e quella del piano inferiore prende il nome di TDI. La rilevazione della temperatura effettuata prima dell'ingresso delle camere di prova è il dato che viene acquisito dal PLC che gestisce il banco prova come informazione fondamentale per la gestione delle vasche in cui viene mantenuta l'acqua da erogare durante i test. Infatti, il PLC analizza sempre l'elenco delle vasche, il loro ordine di utilizzo del test e la temperatura di set che viene fissata per tutte prima che il test inizi. In funzione di questo parametro, scelto dall'operatore in base al tipo di test che vuole eseguire, il PLC aziona le resistenze da riscaldamento installate su ogni vasca in modo da portare le vasche alla temperatura di set richiesta. Una volta che tutte le vasche selezionate nella cosiddetta ricetta hanno raggiunto il valore di temperatura di set l'operatore può procedere con l'avviamento del test. Durante l'esecuzione di quest'ultimo, il PLC continua ad analizzare la temperatura rilevata poco prima delle camere di prova TDS o TDI per mantenerla costante attivando il giusto numero di resistenze da riscaldamento necessarie affinché ciò accada. Date le inerzie termiche che ha il banco prova, il valore di set della vasca spesso non è quello della pioggia voluta durante la fase del test. Le dinamiche del banco prova e, di conseguenza, alcuni accorgimenti pratici sono stati acquisiti e ottimizzati con l'esperienza e con la ripetizione di alcuni test di riferimento.

Il dato principale analizzato per poter trarre tutte le conclusioni dei vari test eseguiti con questo banco prova è la temperatura interna dei campioni inseriti nelle camere di prova. Per poter ottenere questo dato ogni camera di prova è stata equipaggiata di 12 termocoppie tipo "T" IEC 584-2 classe 1. Le sonde di temperatura a termocoppia sono costituite da due cavi con particolari termoelettriche, la cui giunzione ha caratteristiche elettriche variabili con il variare della temperatura. I cavi sono all'interno di una guaina metallica ed un isolamento

elettrico. Il sistema di misurazione è molto affidabile e sensibile alle variazioni rapide di temperatura. Il materiale dei cavi del modello scelto, tipo “T”, sono rame (Cu) e cobalto (Co) ed hanno campo operativo di temperatura compreso tra i 270°C sotto lo zero e i 400 °C sopra lo zero. Lo stelo è lungo 300 mm in modo da poterle inserire dentro i vari campioni per poter misurare la temperatura a cold spot, al centro geometrico della bottiglia o in qualsiasi altro punto del fluido intero ai vari campioni. Spesso, durante i test, vengono registrate le temperature del fluido durante il test in punti diversi. Per poter inserire le sonde e fissarle in modo tale che non si spostino durante i test queste vengono assemblate tramite un portasonda che è stato costruito appositamente per poter eseguire i test. Si tratta di inserto in ottone con le dimensioni necessarie per poterlo fissare al posto del classico tappo a corona nelle bottiglie in vetro e poterlo fissare sui tappi forati per le altre applicazioni. Sulla superficie superiore dell’inserto sono stati fatti 5 fori di diametro 2 mm in modo da poter inserire le sonde di temperatura. Nella parte che viene inserita nel collo della bottiglia è stata realizzata una filettatura che permette, tramite un dado e un paio di rosette, di fissare il portasonda al tappo originale. In base al punto che si vuole monitorare all’interno del campione si definisce una altezza del punto, Figura 3.10. In base alla geometria del campione e al tipo di fluido analizzato si riporta la distanza del punto di misura dalla sezione di ingresso sommata all’altezza del portasonda, che si appoggia su di essa, sullo stelo della termocoppia. Dopodiché la si inserisce sul portasonda stesso e la si fissa all’inserto che poi verrà inserito nel campione. Nelle varie immagini riportate, Figura 3.11, si possono vedere le sonde assemblate e pronte per essere inserite nei vari campioni. Si può notare come, in base al formato sottoposto a verifica, il portasonda può disporre di uno stelo più o meno lungo grazie ad un inserto più o meno lunghi. Quest soluzione è stata studiata per poter eseguire i test con fluidi molto torbidi (succhi di frutta, salse etc) che non permettono una verifica visiva diretta della posizione della sonda. Per i fluidi classici come l’acqua o la birra, invece, questa soluzione potrebbe essere omessa evitando anche di introdurre oggetti nei fluidi i quali potrebbero alterare la misura poiché, con una semplice verifica visiva, ci si può accorgere di un posizionamento non corretto.

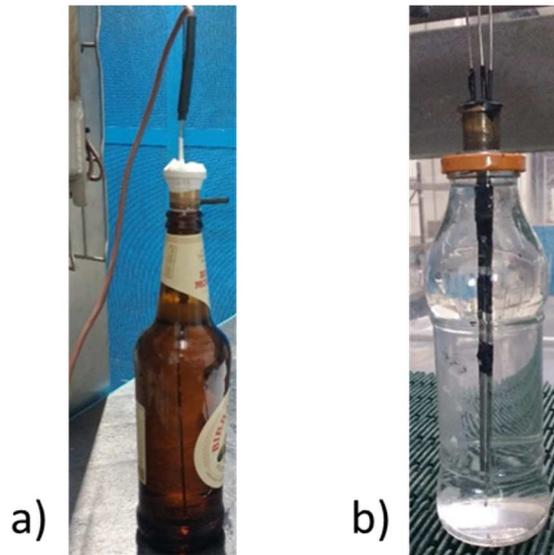


**Figura 3.10 a) Portasonda con stelo e b) portasonda con inserto fissato con tappo originale della bottiglia tramite dado**

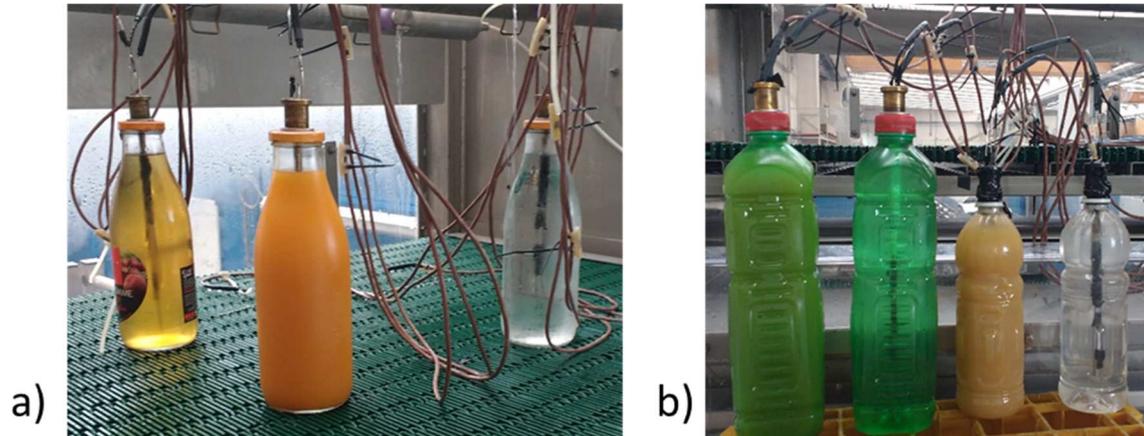


**Figura 3.11 Sonde di temperatura preparate per essere inserite nei campioni da sottoporre a test**

Come si può notare dalle immagini nella Figura 3.12 e nella Figura 3.13, le sonde vengono inserite e, una volta verificata la corretta posizione all'interno del campione Figura 3.14, il portasonda viene fissato e sigillato con del nastro isolante per le bottiglie con sezione di ingresso piccola (20 mm di diametro) oppure viene avvitato e stretto con l'ausilio di un dado al tappo originale del campione precedentemente forato. In questo modo la giunzione diventa a tenuta e si evita che possibili trafileamenti di acqua, erogata sotto forma di pioggia, vadano ad inquinare il fluido sottoposto a test.



**Figura 3.12 Sonde fissate con i relativi porta sonda e inserite nei campioni di birra ed acqua da sottoporre al test**



**Figura 3.13 Sonde fissate con i relativi porta sonda ai tappi originali, inserite nei campioni di acqua e di succo da sottoporre al test, formati da 1 litro in vetro, da 1,5 litri e 0,5 litri in Hot Fill PET**



**Figura 3.14 Dettaglio della sonda di temperatura che rileva la temperatura a Cold Spot**

Dato che il numero delle termocoppie a disposizione all'interno delle camere di prova è elevato, spesso non tutte vengono inserite in campioni. Per avere informazioni di verifica queste sonde possono essere utilizzate per misurare la temperatura delle piogge all'interno della camera. Potrebbe sembrare una informazione ridondante ma in realtà questo accorgimento permette di avere indicazioni su certe situazioni che possono verificarsi durante il processo di pastorizzazione nelle applicazioni industriali. Se la configurazione della macchina è quella a doppio piano, double deck, con spruzzatura eseguita solo nella parte superiore, al prodotto che si trova nel ripiano inferiore arriva l'acqua erogata sotto forma di pioggia che ha già scambiato calore con il prodotto che si trovava al piano superiore. Di quell'acqua è nota la temperatura con cui entra in camera e quindi con quale viene spruzzata. Avendo sonde a disposizione però si può valutare l'effettiva temperatura che si viene creata nella camera posizionandole come viene riportato nella Figura 3.15. In questo modo, collocando delle sonde sparse per l'ambiente della camera, si può anche verificare l'efficienza del pattern utilizzato per la spruzzatura e l'efficacia del tipo di ugello installato. Una volta che l'acqua attraversa il piano di appoggio, formato da una catena a maglie di plastica, scende per gravità e va a scambiare calore con il prodotto al piano sottostante. Posizionando delle sonde, che non vengono utilizzate per l'analisi di temperatura all'interno dei campioni, nell'ambiente della camera inferiore come mostrato nella Figura 3.16 si può avere l'informazione relativa alla effettiva temperatura con cui viene scende la pioggia nella camera.



**Figura 3.15** Termocoppie usate per misurare l'effettiva temperatura della doccia nella camera

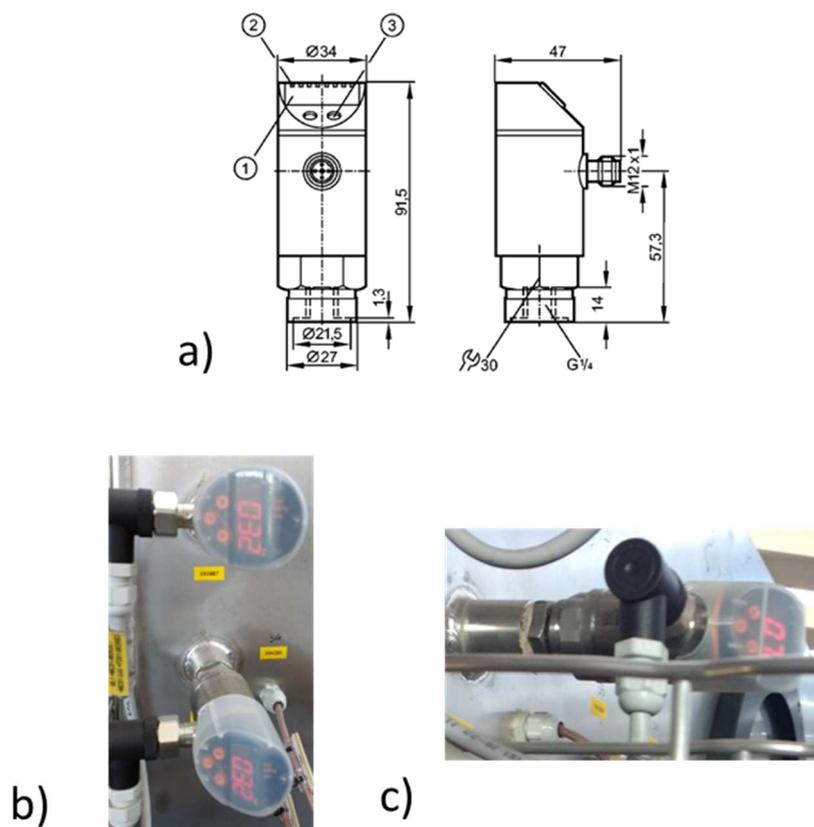


**Figura 3.16** Termocoppie usate per misurare l'effettiva temperatura della doccia nella camera inferiore

### **3.5.3 Misure di Pressione**

La misura di pressione che serve lungo l'impianto idraulico è quella alla quale effettivamente lavora l'ugello installato nei vari tubi porta ugelli all'interno della camera per spruzzare l'acqua sul prodotto. Ciò è dovuto al fatto che per come vengono disegnati in fase di progetto gli ugelli hanno un effettivo range di pressione al quale garantiscono che l'acqua venga erogata tramite un cono con una determinata apertura. Fuori dalle condizioni di progetto non è garantita questa condizione e perciò non viene garantita l'efficienza del trattamento termico a cui viene sottoposto il prodotto. Tutti gli ugelli installati e forniti dai

produttori sono caratterizzati da una curva portata/pressione di lavoro, come verrà spiegato nel dettaglio nei prossimi paragrafi, che quindi potrebbe permettere di evitare questa misura ma, dato che il banco prova è stato costruito per poter raccogliere la maggior quantità di informazioni possibili, sono stati installati due sensori di pressione PN2024 ad ogni piano camera di prova. Si tratta di un sensore adatto alla misurazione di pressione relativa di sostanze liquide e gassose che si trovano nel range di temperatura di  $-25^{\circ}\text{C}$  e  $80^{\circ}\text{C}$ . Il campo di misura indicato nel datasheet dello strumento è compreso tra i  $-1$  bar e  $10$  bar. Il sensore è stato collegato direttamente al tubo porta ugelli tramite un raccordo interno alla camera ma sono stati installati all'esterno per poter essere letti durante il test senza problemi. Come si può vedere Figura 3.17, lo strumento dispone di uno display alfanumerico che permette la lettura immediata della misura. Anche per questo strumento, il segnale viene acquisito dal PLC che gestisce tutto il banco prova e viene poi riportato nel foglio di testo che riporta tutte le grandezze misurate durante un test.



**Figura 3.17 a) Schema costruttivo del sensore pressione e b) e c) sua installazione sulla parte esterna della camera di prova**

Un'altra misura di pressione che viene eseguita sulle vasche in cui viene tenuta in temperatura l'acqua che viene erogata dagli ugelli. Per ogni vasca infatti è stato installato un sensore di pressione con cella di misura affiorante PI2797. Questo strumento di misura permette di tenere sotto controllo il livello delle vasche che, durante la fase di riscaldamento, devono rimanere coperte per evitare il più possibile lo scambio di calore con l'ambiente circostante. Il campo di misura è compreso tra i -0.05 bar e 1 bar. Tramite taratura il display di cui dispone il sensore riporta direttamente i centimetri di colonna d'acqua presenti in vasca. Come nel caso degli altri sensori il dato viene acquisito ed elaborato dal PLC che lo utilizza come per poter gestire l'ingresso dell'acqua di rete alle vasche per compensare eventuali perdite. Come detto, è stato impostato un valore di limite inferiore al di sotto del quale le vasche non devono lavorare soprattutto in fase di riscaldamento poiché si rischi che le resistenze da riscaldamento affiorino e non rimangano completamente immerse nel fluido. Questa situazione è da evitare se non si vuole rischiare che si surriscaldino e che mandino in cortocircuito l'impianto elettrico del banco prova. Nella Figura 3.18 è stato riportato lo schema costruttivo e una foto del sensore installato alla base di ognuna delle cinque vasche di cui dispone il banco prova.

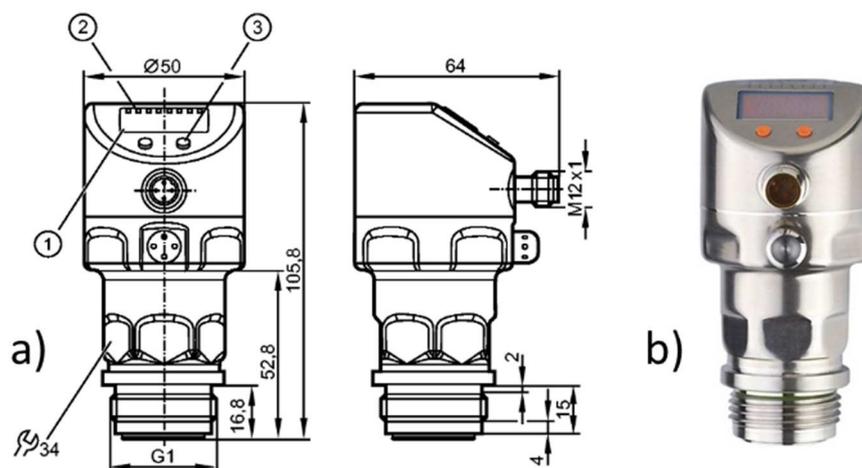


Figura 3.18 a) Schema costruttivo del sensore pressione e b) sensore di pressione

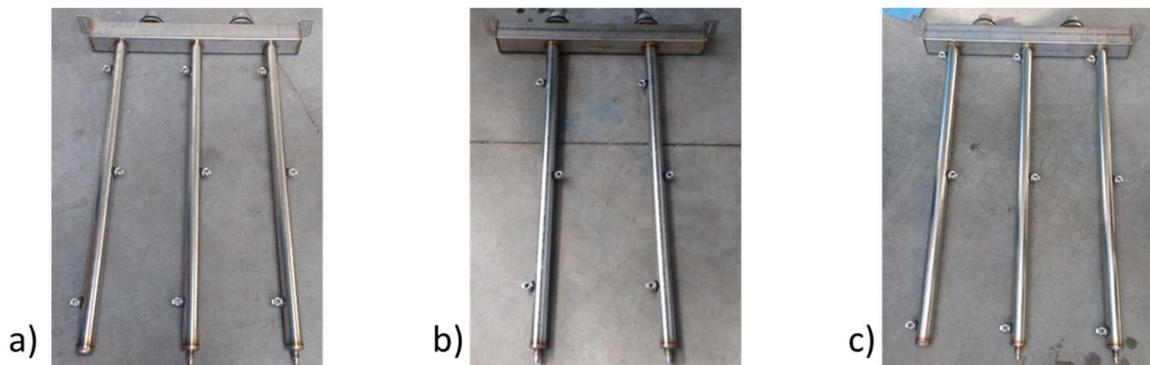
### **3.6 Pattern di spruzzatura e Ugelli**

All'interno delle camere di prova per erogare l'acqua che serve per poter effettuare i vari test deve essere installata una combinazione di tubi e di ugelli. All'interno delle macchine a tunnel vengono installati tubi porta ugelli e ugelli con un determinato passo. La

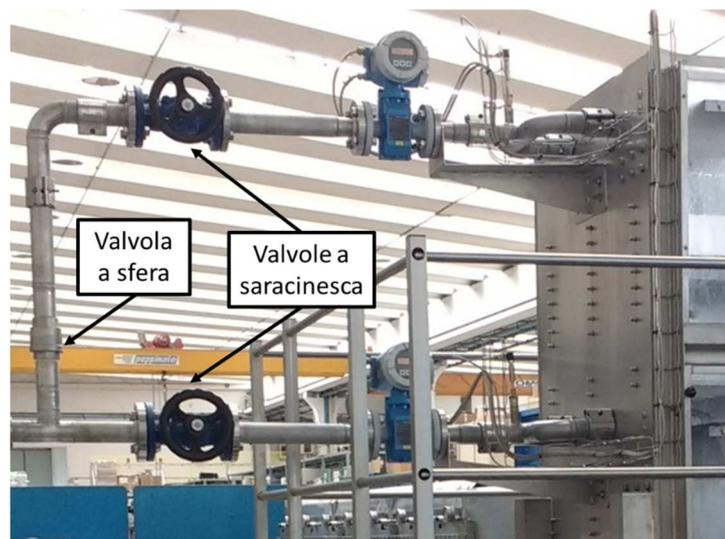
combinazione tra il passo dei tubi porta ugelli e quello degli ugelli stessi definisce il pattern all'interno della macchina. Per poter valutare l'influenza di tale parametro sulle prestazioni delle macchine a tunnel che servono a realizzare il trattamento termico di pastorizzazione è stato deciso di realizzare dei collettori intercambiabili che, in base alle geometrie che si vogliono testare, vengono installati sul tetto della camera di prova all'interno della quale si vuole erogare l'acqua. Nella Figura 3.19 sono state riportate alcune configurazioni pronte ad essere installate. Da un lato del collettore ci sono due raccordi di entrata per l'acqua che dovrà essere erogata. Questi vanno infilati nei rispettivi fori realizzati nella parete in acciaio e poi fissati tramite due giunti Straub all'impianto idrico descritto nei precedenti paragrafi. Alle estremità del collettore sono state realizzate delle asole per il fissaggio tramite bulloni alla parete in acciaio. Dall'altro lato del raccordo, invece, sono stati saldati i tubi porta ugelli alla distanza voluta e che caratterizza poi il pattern. Si tratta quindi una soluzione a sbalzo che viene installata sulla parte di acciaio della camera. Lungo i tubi sono stati realizzati i fori necessari per poter installare gli ugelli al passo che si vuole verificare. Gli ugelli hanno tutti un serraggio a baionetta in modo da poter essere cambiati velocemente e andare a verificare la variazione di prestazione della macchina a parità di pattern. All'altra estremità dei tubi rispetto a quella saldata al collettore, i tubi porta ugelli sono stati chiusi con delle semisfere in modo tale che l'acqua esca solo dagli ugelli. Per poter verificare l'effettiva pressione che si viene a creare lungo il tubo, e quindi quella a cui si trovano a lavorare gli ugelli, almeno due tubi porta ugelli presentano un piccolo giunto idraulico che, tramite un raccordo di plastica flessibile, collega il tubo alla presa di pressione realizzata sulla parete di acciaio. Come descritto nel paragrafo delle misure di pressione, qui sono stati installati dei misuratori di pressione con un display alfanumerico che permette una lettura immediata della misura. Una volta installati i pattern la macchina è pronta per poter lavorare. I pattern possono essere installati o sul tetto della camera superiore o sul tetto della camera inferiore o addirittura in entrambe le camere.

Per gestire l'alimentazione delle due camere di prova bisogna lavorare con le tre valvole installate lungo l'impianto idraulico. Prima di ogni misuratore di portata è stata installata una valvola a saracinesca con regolazione manuale per ottenere in fase di test la portata voluta. Come si può vedere dal layout di Figura 3.20, tra i due rami è stata installata una valvola a sfera che permette di collegare, se aperta, o di isolare, se chiusa, i rami che portano l'acqua alle camere superiore e inferiore. Chiudendo la valvola a sfera l'acqua potrà alimentare solo i tubi porta ugelli installati nel piano inferiore. Chiudendo invece la valvola a saracinesca nel ramo dell'impianto che porta l'acqua al piano inferiore e lasciando aperta

la valvola a sfera l'acqua non potrà far altro che scorrere verso la parte superiore e sarà erogata dentro la camera del piano superiore. Un'altra configurazione può essere ottenuta lasciando aperta la valvola a sfera e aperte con una determinata sezione le valvole a saracinesca. In questo modo si può ottenere una configurazione a doppia erogazione: l'acqua può essere spruzzata sia dai tubi del piano superiore che da quello inferiore regolando in modo opportuno le valvole a saracinesca. In questo modo, possono essere condotti test con tutte le possibili configurazioni che in un secondo momento possono essere riprodotte nelle macchine a tunnel industriali per la pastorizzazione.



**Figura 3.19** Collettori con tubi porta ugelli intercambiabili all'interno delle camere di prova



**Figura 3.20** Regolazione portata nella camera di prova tramite valvola a saracinesca

Gli ugelli che utilizzabili con questo tipo di applicazione si distinguono in funzione del principio con il quale spruzzano l'acqua che gli viene fornita dall'impianto idrico. Si distinguono, infatti, ugelli a cono vuoto e ugelli a cono pieno. Per quanto riguarda gli ugelli a cono vuoto lo spruzzo viene ottenuto grazie ad un ingresso tangenziale del liquido nella camera di turbolenza dell'ugello. All'uscita dell'orifizio dell'ugello si ottiene quindi uno spruzzo a cono vuoto finemente nebulizzato e distribuito uniformemente. Per quanto riguarda gli ugelli a cono pieno le gocce sono invece distribuite all'interno di un volume conico il cui vertice coincide con l'orifizio dell'ugello. Tale forma di getto viene usata molto spesso poiché permette di distribuire uniformemente la portata del liquido erogato. L'applicazione classica viene anche detta cono pieno a turbolenza perché usa un vorticolatore di forma speciale per dare una componente di velocità rotatoria che fluisce attraverso l'ugello. A causa di ciò il liquido all'uscita dell'orifizio, si allarga per forza centrifuga fino ad ottenere la forma di getto richiesta. L'angolo del cono, che può variare da  $15^\circ$  a  $120^\circ$ , è funzione sia del disegno dell'ugello che della pressione di alimentazione. Tali ugelli possono essere costruiti anche per produrre un getto quadro, con la forma piramidale del getto dovuta ad una speciale modifica dell'orifizio dell'ugello. Nella Figura 3.21 sono riportati due esempi di tale funzionamento. Le curve caratteristiche degli ugelli mettono in evidenza la differenza sostanziale che ne determina l'utilizzo: gli ugelli a cono vuoto si trovano a lavorare con pressioni maggiori e, dato che per le applicazioni industriali parliamo di un elevato numero di ugelli per macchina, le perdite di carico aumentano e quindi la taglia delle pompe installate deve essere maggiore.

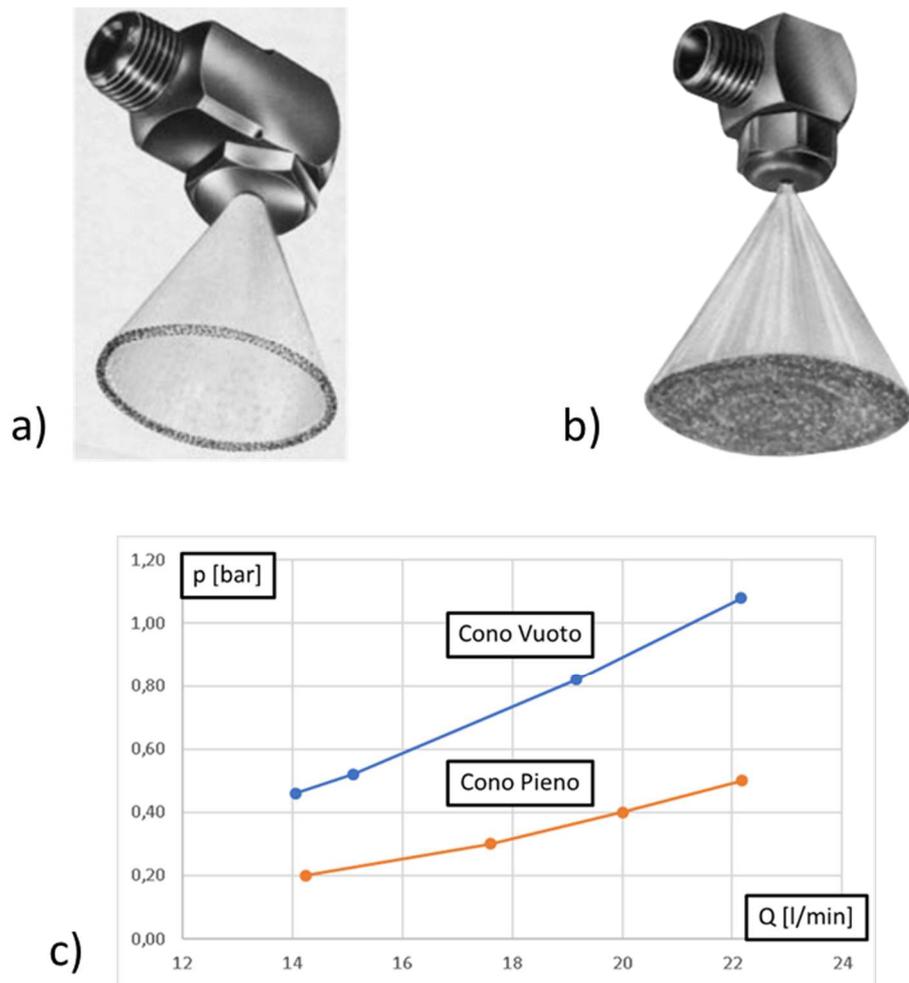


Figura 3.21 Ugelli a) a cono vuoto e b) a cono pieno e c) loro curve caratteristiche messe a confronto

### 3.7 PLC e Acquisizione Dati

Tutta la logica del banco prova è gestita da un PLC principale. Infatti, prima di far partire un qualsiasi test, bisogna settare i parametri principali che andranno a costituire la cosiddetta ricetta. Per fare questo bisogna comunicare con il software che gestisce il banco prova tramite un monitor HMI touch screen, vedi Figura 3.22. Questo tipo di interfaccia permette di scorrere tra le varie schermate di gestione del banco prova. Sulla barra inferiore che è visibile nella Figura 3.22 si può scorrere tra le varie schermate ed ognuna permette di verificare un aspetto diverso del banco prova:

- la prima schermata permette di settare e verificare tutti parametri elettrici
- la seconda schermata serve gli operatori per definire la configurazione delle camere di prova e descrive che tipo di prodotto verrà testato. Tutte queste informazioni

verranno poi riportate nel file di testo che riporta anche tutte le misure eseguite durante i vari test

- la terza e la quarta schermata riportano tutti gli interruttori necessari alla attivazione manuale delle varie valvole pneumatiche che, se il banco prova è settato in “automatico”, verranno gestite direttamente dal software installato sul PLC
- la quinta schermata evidenzia tutti i livelli delle vasche e permette di impostare i livelli minimi e massimi superati i quali il sistema va in allarme
- la sesta schermata permette di seguire a monitor l’andamento del test, inoltre riporta tutti i parametri misurati e permette all’operatore di settare i parametri principali che si vogliono testare
- la settima schermata, Figura 3.23, permette di visualizzare la storia termica registrata dalle varie sonde di temperatura, sia quelle dedicate ai campioni che, in una seconda schermata, quelle dedicate alla temperatura delle docce
- l’ottava schermata riporta le comunicazioni che il PLC manda all’operatore come ad esempio la possibilità di far iniziare il test perché tutte le condizioni di lavoro sono verificate
- la nona e ultima schermata comunica tutti gli allarmi e da informazioni sulle condizioni pericolose che si possono verificare durante l’esecuzione dei test

Quella riportata nel primo esempio, Figura 3.22, è la schermata principale che permette di seguire a monitor l’andamento del test. In questa pagina del menù, infatti, vengono riportate tutte le misure che il banco prova esegue con i vari strumenti che descritti nei paragrafi precedenti. Quindi avremo:

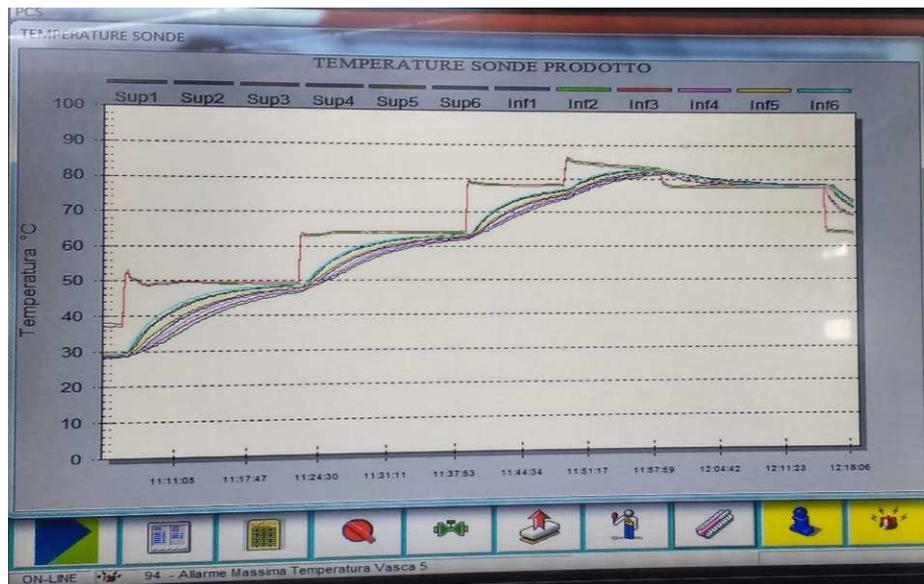
- in alto a destra sono riportate le effettive temperature delle vasche e i relativi valori di set point impostati dall’operatore ad inizio del test
- sempre a destra, con un pallino rosso vengono indicate le resistenze da riscaldamento che sono effettivamente attive in quel momento
- sempre a destra nella zona centrale sono riportate le temperature misurate dalle 12 sonde che possono essere inserite all’interno dei vari campioni sottoposti al test
- in basso a destra l’interfaccia grafica permette di avere sotto controllo il numero di pompe attive e, di conseguenza, il numero di vasche coinvolte nel test
- nella zona centrale del monitor ci sono i pulsanti relativi alla fase di avvio e di stop forzato del test

- come indicato dalla freccia che si trova al centro ma in alto, il banco prova è settato in automatico, ovvero la logica che permette di seguire la ricetta è quella che ha già in memoria il PLC. Per poter testare condizioni fuori progetto, anche se non è consigliabile, c'è la possibilità di impostare i comandi in manuale in modo tale che ogni regolazione, attivazione o chiusura debba essere fatta dall'operatore
- sulla parte sinistra dello schermo è riportata la "ricetta" ovvero la sequenza delle vasche da cui viene prelevata l'acqua che viene poi erogata nella camera di prova con i relativi intervalli di tempo (minuti e secondi). I campi devono essere impostati dall'operatore prima che il test abbia inizio ma possono essere modificati in corso d'opera. A lato di ogni fase è presente un conto alla rovescia che indica il tempo rimasto affinché la fase venga conclusa.



Figura 3.22 Interfaccia HMI touch screen del PLC che gestisce il banco prova

Quella riportata nel secondo esempio, Figura 3.23, è la schermata che illustra la storia termica registrata dalle termocoppie poste all'interno della camera di prova e permettono di seguire a monitor l'andamento del test. Ogni sonda ha un colore caratteristico riportato nella legenda posta nella zona superiore del monitor. Le sonde sono state designate con un codice alfanumerico: la lettera definisce se fanno riferimento al piano superiore (S) o inferiore (I) e il numero invece va da 1 a 6. Spesso il codice della sonda identifica anche la posizione nella quale vien testato un determinato prodotto.



**Figura 3.23** Interfaccia HMI touch screen del PLC che riporta la storia termica registrata dalle sonde poste all'interno della camera di prova

### **3.8 Ciclo di pastorizzazione o Ciclo di raffreddamento**

Tutti gli strumenti di misura descritti e tutta la logica di funzionamento del banco prova è stata studiata per poter eseguire test sui vari prodotti riportati all'inizio del capitolo (acqua, birra, succhi di frutta) ma non tutti i prodotti subiscono lo stesso trattamento alla fine del loro ciclo di produzione. Una volta imbottigliata, la birra deve subire un ciclo di pastorizzazione completo che può richiedere fino a cinque fasi di riscaldamento e quattro fasi di raffreddamento. Il banco prova, grazie alle cinque vasche e alla possibilità di tenere sotto controllo la temperatura al loro interno, permette di eseguire il ciclo completo impostando, tramite i comandi a monitor descritti in precedenza, gli intervalli di tempo da rispettare. Se invece il prodotto, come i succhi di frutta, necessita solo della fase di raffreddamento possono essere impiegate solo le vasche necessarie per questo tipo di verifica.

Data la versatilità del banco prova possono essere investigati vari tipi di fluidi magari cercando anche di estendere il campo di conoscenza a fluidi di interesse ma con caratteristiche molto diverse da quelli convenzionali come, ad esempio, la passata di pomodoro, la marmellata e altri prodotti del mercato che devono subire un trattamento termico prima di essere immessi nel mercato o nella grande distribuzione.

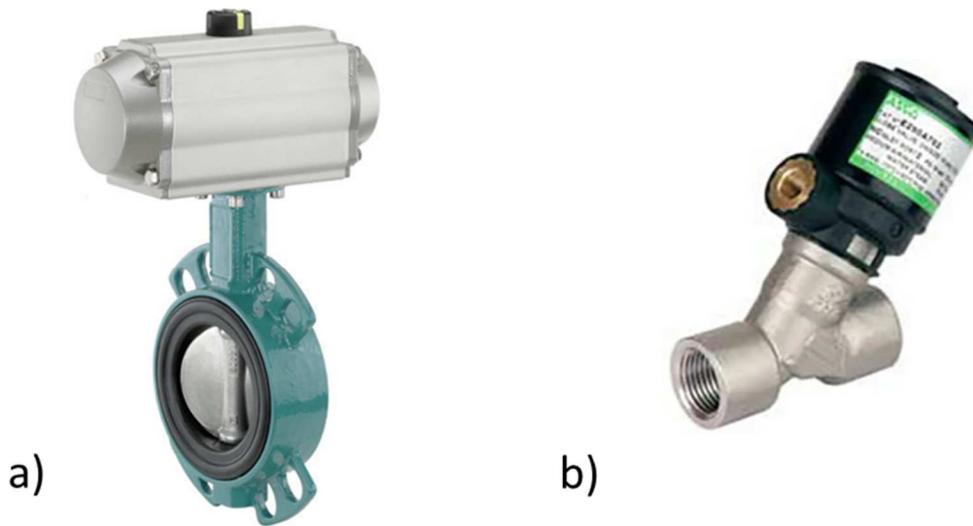
### **3.9 Messa in opera del banco prova**

Una volta che il banco prova è stato progettato si è passati alla realizzazione fisica dell'apparato presso i laboratori dell'azienda Sidel nella sede di Verona. Grazie alla loro esperienza nel progettare questo tipo di macchine, seppur in forma molto più ridotta rispetto alle applicazioni industriali, sono state trovate delle soluzioni di layout e di componenti che hanno reso il banco prova versatile. Come detto, il PLC gestisce tutto il banco prova e si basa sullo stesso software che gestisce le applicazioni industriali quindi ha una logica ottimizzata da anni di esperienza acquisita in campo. Per questo motivo, il controllo PID che è stato installato ed è stato facilmente ottimizzato per questo tipo di progetto. Infatti, il controllo Proporzionale-Integrale-Derivativo è un sistema in retroazione negativa ampiamente impiegato nei sistemi di controllo di applicazioni industriale. Grazie a un input che determina il valore attuale, il PID è in grado di reagire a un eventuale errore positivo o negativo. La reazione all'errore viene regolata in modo che sia adeguata sia in termini di velocità che di ampiezza.

La maggior parte delle regolazioni imposte dal banco prova è legata a valvole del circuito idraulico che vengono attivate da un sistema di aria compressa. Infatti, sul fondo del convogliatore che raccoglie l'acqua utilizzata durante i test, sono installate cinque valvole a farfalla con attivazione pneumatica che consentono di deviare il flusso d'acqua nella stessa vasca da cui viene prelevata l'acqua erogata dagli ugelli. Lungo il circuito idraulico, per deviare i vari flussi, sono state installate delle valvole a pistone pneumatiche. Nella Figura 3.24 sono riportate degli esempi dei sistemi descritti.

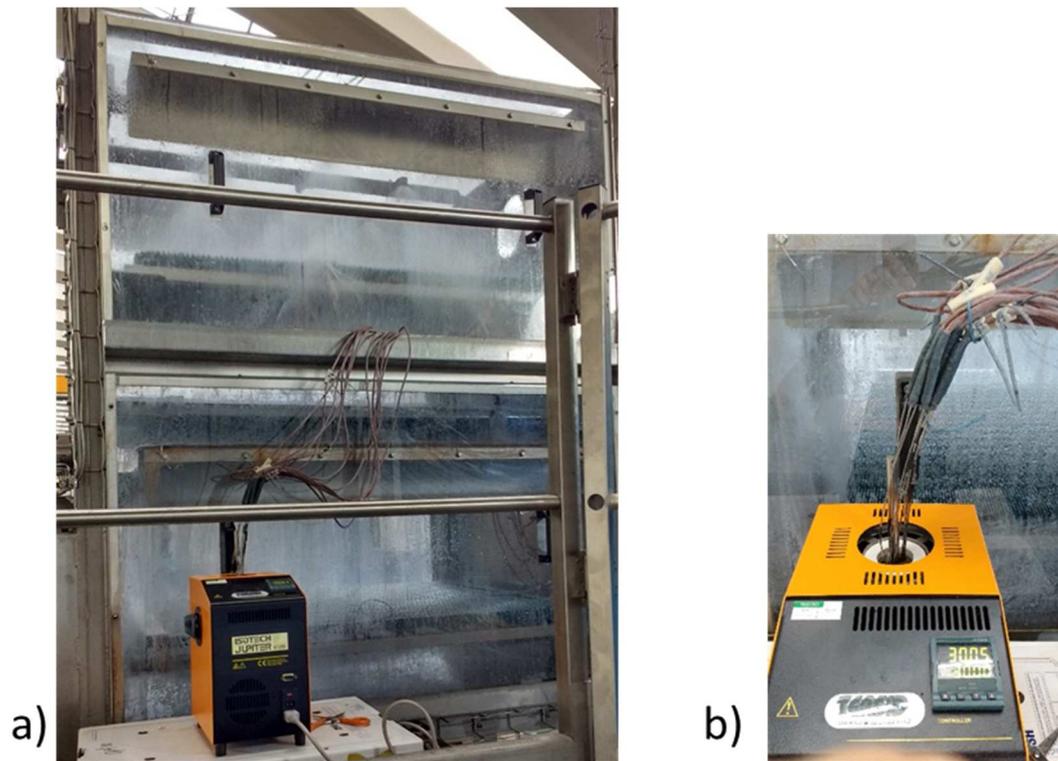
Una volta installato tutto, il banco prova andava collaudato quindi una alla volta sono state verificate le varie regolazioni possibili:

- l'attivazione delle vasche richieste
- la regolazione del livello e della temperatura dell'acqua delle vasche
- l'apertura e la chiusura delle valvole in automatico e di quelle manuali
- la corretta esecuzione della ricetta



**Figura 3.24 Valvole idrauliche installate nel circuito e attivate dal PLC tramite attivazione pneumatica: a) valvola a farfalla; b) valvola a pistone**

Prima di procedere all'esecuzione dei vari test con il banco prova, è stato infine necessario eseguire la taratura delle dodici termocoppie installate nelle due camere di prova. Per fare ciò è stata seguita la procedura standard per questa operazione che prevede di utilizzare un fornetto di taratura: impostando i valori di riferimento si verifica la risposta delle sonde. Il fornetto, che è stato utilizzato nel nostro caso, ha a disposizione un monitor che permette di definire la temperatura fino al centesimo di grado, le sonde vengono inserite sull'apertura superiore e vengono tenute in posizione da una serie di sedi per alloggiarle e tenerle fisse durante la procedura. Nella Figura 3.25 vengono riportate le immagini della procedura di taratura delle sonde.



**Figura 3.25 a) Taratura termocoppie tramite fornello di prova, b) dettaglio sulle sonde inserite nel fornello di prova**

Dopo aver verificato la logica di lavoro del banco prova e aver tarato le termocoppie che verranno inserite nei vari campioni da sottoporre a test.



# Capitolo 4

## Analisi sperimentale dei processi di pastorizzazione per il prodotto birra

### **4.1 Definizione del prodotto birra sottoposto a trattamento termico**

Il processo di trattamento termico di pastorizzazione, come visto nei capitoli precedenti, può essere applicato a molti prodotti alimentari per poterne aumentare il periodo di conservazione dato l'effetto battericida. Uno dei tanti prodotti industriali che subisce questo trattamento termico è la birra, una delle bevande più diffuse e consumate nel mondo.

Con birra si intende una bevanda alcolica ottenuta dalla fermentazione di mosto a base di malto d'orzo aromatizzata e amaricata con luppolo. La birra è una delle più diffuse e più antiche bevande alcoliche del mondo. Viene prodotta attraverso la fermentazione alcolica con ceppi di *Saccharomyces Cerevisiae* di zuccheri derivanti da fonti amidacee, la più usata delle quali è il malto d'orzo ovvero l'orzo geminato ed essiccato. Possono anche essere utilizzati altri cereali come frumento, mais, riso, avena, farro e segale. La prima fase della produzione della birra prevede la macinazione dei malti e degli altri cereali eventualmente impiegati nella ricetta del mastro birraio: i chicchi vengono sminuzzati grossolanamente grazie ad un mulino, quindi posti in acqua preriscaldata attorno ai 45 50 °C. Segue la fase di ammostamento, ovvero il mosto, costituito da acqua e grani sfarinati,

viene sottoposto ad un trattamento termico che prevede precise soste termiche a temperatura crescenti e per tempi definiti. In questo modo le grandi molecole dei malti vengono solubilizzate, degradate parzialmente a unità semplici. Durante questo processo, in particolare, l'amido si trasforma in zuccheri semplici, fermentabili dai lieviti. Con il mash out, alla temperatura di 78°C, il mosto viene sottoposto alla filtrazione, in modo da eliminare le trebbie, cioè i residui solidi del malto e dei cereali. Il mosto liquido viene sottoposto ad un processo di bollitura della durata di circa 90 minuti, durante il quale avviene anche l'aggiunta del luppolo che conferisce il gusto amaro della birra ed aromi tipici dell'essenza. La scelta delle miscele di luppolo di differenti varietà dona alla birra finita una ricchezza organolettica peculiare e riconoscibile. Lo step successivo prevede il whirlpool, ovvero una decantazione dinamica che elimina i residui del luppolo ed i precipitati soliti, detti trub, che si addensano durante la bollitura. Il mosto viene, quindi portato alla temperatura di circa 15 °C, in modo da permettere il successivo avvio della fermentazione (rispettivamente ale o lager, in funzione della temperatura a cui è mantenuto il mosto). L'attività dei lieviti *Saccharomyces* consente di trasformare nell'arco di 7-15 giorni il mosto zuccherino in vera e propria birra contenente etanolo. Durante la fermentazione alcolica si sviluppa anche anidride carbonica, una parte della quale donerà la tipica gasatura alla birra finita, inoltre si originano aromi che arricchiscono la birra a livello organolettico. Un travaso finale consente di eliminare la feccia di lievito, ovvero il deposito di cellule morte che si accumula sul fondo del tino di fermentazione. La birra viene lasciata ad affinare per alcune settimane, in modo da consentire una evoluzione positiva ed un arrotondamento delle caratteristiche organolettiche e gustative. Non resta, infine, che procedere al confezionamento in bottiglie, fusti o lattine in modo che possa raggiungere il consumatore finale. Conclusi tutti questi passaggi, la birra viene sottoposta al processo termico di pastorizzazione per garantire la perfetta conservazione durante il periodo di permanenza nei depositi e poi fino al momento del consumo.

La birra ha origini remote che ne fanno una delle bevande più antiche e maggiormente ricche di storia, la quale si intreccia con i destini dei popoli antichi sin dalla Mesopotamia e delle regioni limitrofe. La prima testimonianza chimica nota infatti è datata intorno al 3500-3100 a. C. ma, poiché molte sostanze contenenti carboidrati come ad esempio zucchero e amido possono andare naturalmente incontro a fermentazione, è probabile che bevande simili alla birra siano state inventate l'una indipendentemente dall'altra da diverse culture in ogni parte del mondo. Si parla quindi di popoli arabi per poi passare da Egitto, Antica Grecia e Roma e, infine, alla diffusione in tutto il suo Impero. La birra trovava però

i suoi più sostenuti bevitori nei cosiddetti popoli barbarici ovvero Germani e Celti. Il primo cambiamento fondamentale della ricetta, e quindi della tecnologia produttiva, avviene durante il Medioevo quando i monaci nei loro monasteri operano il salto di qualità introducendo nuovi ingredienti tra i quali il luppolo.

L'inizio della storia moderna della birra coincide, come accaduto per la maggior parte dei processi produttivi, con la rivoluzione industriale. Le innovazioni scientifiche introdotte nella seconda metà del Settecento hanno permesso di incrementare via via l'automazione, il miglioramento dell'efficienza ed il controllo delle fasi di fabbricazione, trasformando così la produzione birraria da un'attività empirica ad un vero e proprio processo industriale. Le innovazioni tecnologiche individuabili come pietre miliari dell'evoluzioni del sistema di fabbricazione della bevanda sono la messa a punto del motore a vapore seguito dall'invenzione del termometro nel 1760 e del densimetro nel 1776. Quest'ultimo strumento rivoluzionò il processo produttivo poiché con questo i mastri birrai poterono calcolare la produzione a partire da malti differenti rivoluzionando le ricette. Un altro passo tecnologico di rilievo avvenne con l'invenzione del tostacaffè nel 1817 ad opera di Wheeler. I progressi nel campo della microbiologia, inoltre, furono rilevanti nella modernizzazione della produzione birraria. In particolare, i ritrovati scientifici di metà Ottocento ad opera di Luis Pasteur sul ruolo dei lieviti permisero il miglioramento del controllo della fermentazione e la prevenzione delle alterazioni ad opera della flora microbica alterante. La tecnica e gli impianti, pur ampliandosi di capacità produttiva rimasero sostanzialmente inalterati fino alla seconda metà del Novecento. Nel 1953 il neozelandese Coutts sviluppò la tecnica della fermentazione continua, ovvero in taniche sigillate, sotto pressione e al riparo dall'aria. I successivi progressi nei sistemi di refrigerazione, nella logistica e nel marketing hanno permesso infine lo sviluppo di un mercato globale che consente oggi al consumatore di poter gustare una gamma di birre diversissime ma rappresentative del panorama produttivo tradizionale ed innovativo mondiale. La pastorizzazione riveste un ruolo fondamentale quindi per permettere alla grande distribuzione la commercializzazione della vasta produzione della bevanda poiché permette di aumentare la vita del prodotto.

## **4.2 Descrizione della procedura del test nella camera di prova**

Per ottenere una buona conoscenza degli effetti del processo che il prodotto subisce durante il trattamento termico della pastorizzazione è stato quindi scelto di sviluppare sia un modello numerico che un banco prova per affiancare alla ricerca numerica la verifica sperimentale. All'interno del laboratorio dell'azienda coinvolta nella collaborazione Sidel è

stato quindi realizzato e messo in opera il banco prova descritto dettagliatamente nel capitolo precedente.

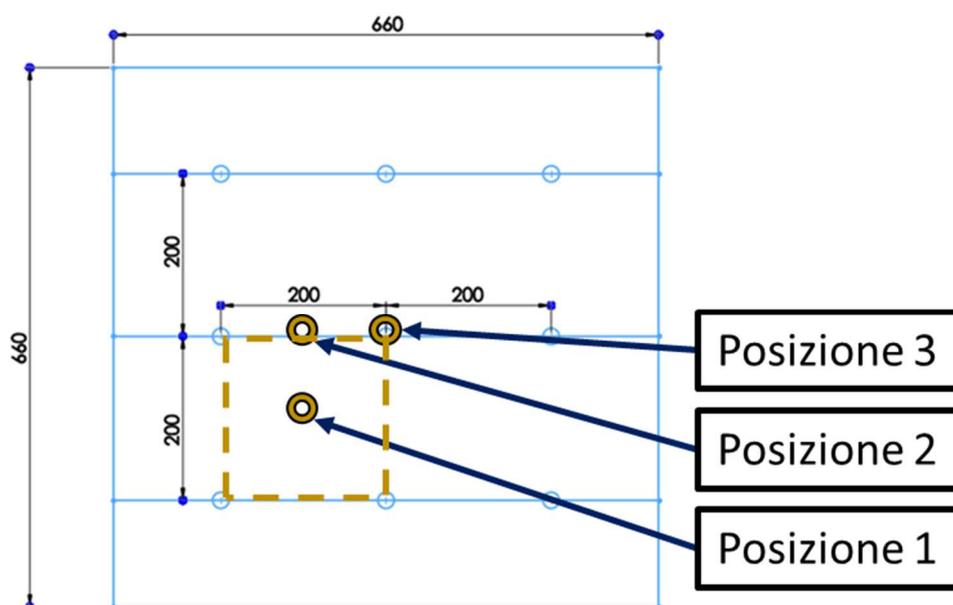
#### **4.2.1 Posizionamento dei campioni sul piano della camera di prova**

Il banco prova è stato studiato in modo tale che possa riprodurre il trattamento termico di pastorizzazione realizzato con macchina a tunnel. Come detto, però, il nastro trasportatore non è stato integrato poiché avrebbe complicato enormemente la procedura dei test e la logica di controllo del banco prova stesso. Per ovviare a questa limitazione tecnologica è stato scelto di inserire nella camera di prova tre campioni strumentati del formato del quale si vuole studiare il comportamento mettendoli in tre posizioni diverse nel piano della camera di prova. Come detto in precedenza, le macchine a tunnel permettono il trattamento del prodotto grazie all'utilizzo di piogge che, in base alla temperatura imposta, scaldano e raffreddano gradualmente il prodotto. Per ottenere queste piogge vengono utilizzati degli ugelli posti sul tetto della macchina, montati su una serie di tubi portaugelli, che partono da un collettore posto su un lato della macchina dove arriva l'acqua alla corretta temperatura dalle vasche relative ad ogni zona. I tubi portaugelli e gli ugelli stessi hanno un determinato passo che, per come sono configurate adesso le macchine a tunnel, permettono un trattamento termico corretto su tutto il piano della macchina. Data questa configurazione, sul piano della camera di prova possono essere individuate tre posizioni caratteristiche. Se si prende a riferimento il "quadrato" che viene a formarsi da quattro ugelli, posti due su un tubo e due sul successivo tubo porta ugelli, e si sfrutta la simmetria che questa figura geometrica ha intrinseca si possono definire le posizioni:

- Posizione 1: il prodotto viene a trovarsi a metà della diagonale del "quadrato"
- Posizione 2: il prodotto viene a trovarsi a metà del lato del "quadrato"
- Posizione 3: il prodotto viene a trovarsi in un vertice del "quadrato" ovvero esattamente sotto uno degli ugelli

Nella Figura 4.1 è stato riportato lo schema del "quadrato", definito dalla linea tratteggiata, formato dai quattro ugelli. Si può notare come, per come è stata costruita la camera di prova, si possono individuare ben quattro quadrati diversi. Ciò potrà essere utile nelle eventuali prove per valutare l'uniformità del trattamento termico nel piano della camera di prova e, se si volesse aumentare la numerosità dei campioni da cui ricavare informazioni sul trattamento termico a cui vengono sottoposti, per posizionare più prodotti in posizioni omologhe.

Analizzando la dinamica del nastro trasportatore su cui poggiano i prodotti nelle macchine a tunnel si può inoltre dire che le tre posizioni, che durante le prove sperimentali che verranno eseguite presso il laboratorio saranno statiche, si alternano durante la durata del trattamento termico. Infatti, prendendo in considerazione una probabile fila di bottiglie in ingresso, quelle che inizialmente si trovano nella Posizione 2 saranno portate dal movimento del nastro ad attraversare l'area del quadrato passando per la Posizione 1, ovvero quella che fa riferimento alla metà della diagonale del quadrato formato da quattro ugelli. Analogamente, le bottiglie che inizialmente si trovano nella Posizione 3 saranno portate dal movimento del nastro ad attraversare l'area del quadrato passando per la Posizione 2', ovvero quella che fa riferimento alla metà del lato del quadrato formato da quattro ugelli analoga alla Posizione 2 evidenziata nella Figura 4.1.



**Figura 4.1** Schema del “quadrato”, definito dalla linea tratteggiata, formato da quattro ugelli e posizioni caratteristiche in cui vengono posti i campioni nel piano della camera di prova

#### **4.2.2 Strumentazione dei campioni da sottoporre ai test**

Una volta definite le posizioni da analizzare all'interno del piano del banco prova si posizionano i campioni all'interno della camera e si decide di strumentarli in base alle temperature che si vogliono registrare. Nel caso della misura della temperatura a Cold Spot, ovvero il punto con dinamica più lento in fase di riscaldamento che viene preso a riferimento durante le analisi per il prodotto birra, si deve inserire la sonda di temperatura di tipo “T”

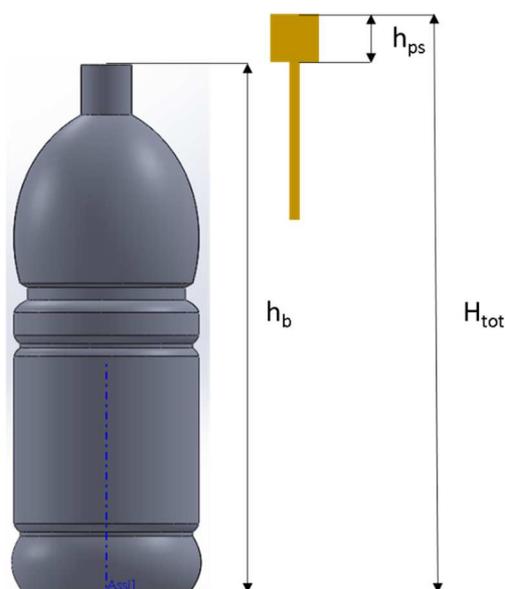
nel campione. Nel caso in cui il campione sia una bottiglia, la sonda deve essere inserita dal foro su cui viene applicato il tappo, durante normale fase di produzione, sul quale viene fissato un tappo sostitutivo appositamente realizzato per poter fissare le sonde. Nel caso in cui il campione sia una lattina, per poter inserire la sonda all'interno è necessario eseguire un foro su una delle superfici cilindriche orizzontali del contenitore in alluminio. Si ricorda che le lattine, in genere, vengono trattate capovolte rispetto alla direzione con le quali vengono abitualmente aperte e utilizzate dai consumatori. Si tratta quindi di fare un foro del diametro corretto per poter inserire il tappo portasonda, appositamente costruito, sul fondo della lattina e non sul lato con la linguetta che permette di aprire tradizionalmente il contenitore. Per scegliere la corretta altezza a cui fissare la sonda sul tappo portasonda si deve seguire la seguente procedura, le altezze sono riprese nella Figura 4.2:

- si misura l'altezza del prodotto
- si somma l'altezza del tappo portasonda
- da questo valore si toglie la distanza del punto dal fondo
- si riporta questa misura sullo stelo della sonda
- si infila la sonda nel tappo portasonda e la si fissa con il nastro isolante lungo lo stelo del tappo portasonda stesso in modo tale che sia allineata
- si inserisce il tappo portasonda nel foro del campione
- se possibile, nel caso di fluidi non torbidi e di contenitori trasparenti, si esegue un controllo visivo in modo da verificare che la sonda rilevi la temperatura nel punto adeguato in particolar modo verificando che si trovi in corrispondenza dell'asse di assialsimmetria del campione
- si fissa il tappo portasonda sul campione o con il nastro isolante per evitare eventuali infiltrazioni o serrando il dado sulla filettatura realizzata su parte dello stelo

Nel caso in cui si vogliano registrare più temperature all'interno del campione la procedura non cambia dato che è necessario seguire la stessa procedura per fissare le diverse altezze delle altre sonde e fissarle poi sul tappo portasonda. In questo modo possono essere inserite nel campione fino ad un massimo di cinque sonde. Esempi di bottiglie strumentate sono riportate nella Figura 3.12 e nella Figura 3.13 all'interno del paragrafo relativo alle misure di temperatura.

Per poter simulare al meglio la situazione che viene a crearsi nel funzionamento della macchina a tunnel durante una fase del trattamento termico di pastorizzazione nelle

applicazioni industriali, i singoli campioni posti all'interno della camera nelle tre posizioni citate in precedenza vengono circondati da altri campioni dello stesso formato e prodotto.



**Figura 4.2** Raffigurazione delle altezze: altezza della bottiglia ( $h_b$ ), altezza del tappo portasonda ( $h_{ps}$ ) e altezza totale ( $H_{tot}$ )

### **4.2.3 Definizione delle variabili da verificare durante il test**

La variabile principale, e in funzione della quale dovranno poi essere messi in relazione i dati ottenuti, è la portata specifica di acqua che entra nella camera di prova e che viene poi erogata tramite gli ugelli, a cono pieno per questo tipo di test. Come descritto nel capitolo precedente, questo parametro viene regolato da una valvola a saracinesca porta prima dell'ingresso del condotto principale nel collettore. Utilizzando la configurazione di valvole corretta, si sceglie in quale camera erogare l'acqua definendo se la prova è a doppio piano o singolo piano (camera superiore o camera inferiore). Viene avviato il banco prova in modo che l'acqua scorra nel circuito. Si procede quindi alla regolazione manuale, prendendo a riferimento il valore riportato dal monitor del misuratore di portata elettromagnetico posto in serie alla valvola a saracinesca lungo il condotto principale. Fissata la portata a cui si vuol eseguire il test si spegne il banco prova e si procede con il passo successivo.

#### **4.2.4 Scrittura della ricetta per il test**

Una volta inseriti i campioni strumentati all'interno della camera di prova e fissata la portata da erogare in camera si procede alla definizione delle operazioni che il plc deve eseguire per far avvenire il test. Usando la pagina dedicata si definisce in breve l'elenco delle caratteristiche della prova che vengono poi riportate nel file di test che il plc elabora alla fine di ogni test:

- tipologia di prodotto
  - formato del contenitore (1500ml, 1200ml, 660ml, 500ml, 330ml, 125ml, altro)
  - materiale del contenitore (alluminio, vetro, PET, altro)
  - tipo di fluido (birra, acqua, succo di frutta, altro)
  - temperatura iniziale del prodotto
- configurazione del banco prova
  - single o double deck
  - pattern installato (200X200 ad esempio)
  - tipologia di ugelli installati (cono pieno, cono vuoto, a lama, altro)
  - distanza tra i tubi portaugelli e il piano di appoggio della camera di prova
  - portata erogata in camera
- durata totale della prova

Una volta compilati i campi legati alla caratterizzazione della prova si passa alla pagina operativa del banco prova e si definisce la ricetta da seguire:

- si attivano le vasche da utilizzare durante la prova (da un minimo di una a un massimo di cinque)
- si fissano le temperature di set point delle vasche attivate
- si definisce la sequenza delle vasche e la durata in minuti e in secondi per le quali viene erogata l'acqua per la relativa vasca, ovvero la "ricetta"

Una volta che sono state compilati tutti i campi descritti, il plc verifica i livelli di acqua nelle vasche e, al raggiungimento del set point delle temperature per ognuna delle vasche, dà il via libera per poter iniziare il test. Dopo che il test è stato avviato, il plc procede in automatico e porta a termine la prova in base alla ricetta definita in precedenza. Alla conclusione dell'esperimento, il banco prova va in configurazione di stand by e mantiene le vasche in temperatura in modo tale che si possa eseguire nuovamente il test appena concluso. Alla conclusione dell'esperimento, inoltre, il plc compila il file di testo che riporta tutte le

caratteristiche inserite all'inizio più le varie misure rilevate ad intervalli regolari di dieci secondi:

- il numero della vasca da cui viene prelevata l'acqua erogata
- le dodici temperature rilevate dalle sonde "T"
- le temperature delle cinque vasche
- i livelli delle cinque vasche
- la temperatura dell'acqua erogata (al piano superiore e al piano inferiore)
- la portata dell'acqua erogata (al piano superiore e al piano inferiore)
- le pressioni rilevate sui tubi portaugelli (al piano superiore e al piano inferiore)

### **4.3 Test di pastorizzazione della birra**

La portata specifica è il parametro con il quale fare le prime considerazioni. Definita una configurazione della macchina e un prodotto si può quindi scegliere di eseguire una serie di test facendo variare la portata e verificare quindi le prestazioni della macchina. Per potere confrontare i diversi test fra loro risulta necessario utilizzare un parametro che serva per adimensionalizzare la misura della temperatura. Con la strumentazione installata sul banco prova si possono definire le:

- $T_t$ : temperatura misurata all'interno del campione al generico istante  $t$
- $T_i$ : temperatura misurata all'interno del campione all'istante iniziale
- $T_d$ : temperatura dell'acqua erogata dagli ugelli sotto forma di doccia

Se si vuole costruire un parametro adimensionale a partire dalle misure a disposizione si può considerare, in accordo con i lavori di Lewicki, (Lewicki, 1985), il parametro  $DT_t$  espresso da un rapporto riportato nella equazione 4-1:

$$DT_t = \frac{T_t - T_i}{T_d - T_i} \quad 4-1$$

L'importanza strategica di questo parametro risulterà fondamentale per lo svolgimento di tutte le prove sperimentali che verranno eseguite. Infatti, con questo valore si possono mettere a confronto gli esiti delle varie prove sperimentali che, per la loro stessa natura non possono avere le stesse identiche condizioni al contorno. Ad esempio, la temperatura della doccia creata dagli ugelli potrà avere una certa variabilità dalla quale si può però ricavare un valore medio caratteristico della prova. Da questa considerazione, ne

deriva anche che il parametro  $DT_t$  sarà affetto da una serie di errori sperimentali da tenere sempre in considerazione. Analizzando la catena di misura e la procedura utilizzata per effettuare la misura stessa, il valore di  $DT_t$ , che verrà poi messo in relazione alla variabile portata specifica erogata in camera, sarà affetto principalmente da tre fonti di errore:

- errore di misura della sonda di tipo “T” utilizzata per eseguire la misura
- errore dovuto al non perfetto posizionamento della sonda nel punto di misura soprattutto quando non è possibile la verifica visiva come nel caso di lattine o nel caso di fluidi torbidi
- errore dovuto all’andamento non costante della temperatura delle piogge  $T_d$

Per quanto riguarda la prima fonte di errore, le caratteristiche tecniche dello strumento sono già state riportate nel paragrafo 3.5.2 relativo alle misure di temperatura.

Per quanto riguarda la seconda fonte di errore si cerca di ridurre il più possibile la causa utilizzando uno stelo adeguato che guida la sonda nella corretta posizione all’interno del contenitore.

Per quanto riguarda la terza fonte di errore, si è riusciti a valutare, dopo aver eseguito una serie di prove sperimentali volte a quantificare proprio questo parametro, che la misura della temperatura delle docce va accettata con una incertezza di misura di  $0.7^\circ\text{C}$ . Ciò è dovuto alle varie inerzie termiche e alle perdite relative ai condotti attraversati dall’acqua nel circuito che parte dalla vasca, dalla quale viene prelevata l’acqua, e arriva agli ugelli delle camera di prova aggiunte a quelle del percorso di ritorno alla vasca stessa. Questo dato, relativo al banco prova realizzato presso i laboratori del reparto di ricerca e sviluppo dell’azienda Sidel, trova conferma anche dai dati acquisiti durante le misure su applicazioni industriali che la stessa azienda opera durante la fase di taratura delle macchine una volta che queste vengono installate lungo la catena di produzione delle aziende produttrici di bevande.

Un altro vantaggio dell’utilizzo del parametro  $DT_t$  per l’analisi dei risultati delle prove svolte è che, questo valore, può essere caratteristico di tutte le zone di una macchina a tunnel per il trattamento termico di pastorizzazione. Se si fissa lo stesso intervallo di tempo in cui considerare la temperatura di inizio e quella finale, ovvero dopo che è trascorso il tempo caratteristico della zona di trattamento termico, adimensionalizzare la temperatura del prodotto in relazione a quelle delle docce permette di fissare una procedura standard di test

significativa per tutte le fasi. Non servirà quindi eseguire test con tutti gli intervalli di tempo e temperatura che vengono applicate nelle applicazioni industriali per verificare le prestazioni della macchina. Per questo motivo i test eseguiti hanno seguito la seguente procedura:

- 1) Si decide di verificare le prestazioni della configurazione double deck con erogazione dell'acqua solo al piano superiore con il pattern descritto in precedenza. Dopo aver strumentato le posizioni i tre campioni nelle corrispettive posizioni sia nella camera superiore che nella camera inferiore, vengono aggiunti campioni dello stesso formato in modo da simulare il riempimento del nastro trasportatore come nel caso di lavoro a regime della macchina.
- 2) Si imposta la ricetta del test fissando i parametri:
  - a. temperatura vasca 1,  $TV1=35^{\circ}\text{C}$
  - b. temperatura vasca 2,  $TV2=75^{\circ}\text{C}$
  - c. temperatura di soglia del prodotto,  $TS1=TI1=35^{\circ}\text{C}$
  - d. durata in termini di tempo della fase 2,  $t=5'$ .
  - e. Durata in termini di tempo della fase 3,  $t=20'$

Con questi parametri si eseguiranno tutti i test caratteristici per una fase di riscaldamento, vero problema per il trattamento termico di pastorizzazione della birra, poiché solo se il prodotto raggiunge e viene mantenuto ad una certa temperatura di soglia otterrà il valore delle UP che il cliente deve garantire per legge affinché il prodotto sia commercializzabile.

- 3) Una volta che il plc permette di far partire il test, si esegue lo start e l'acqua della vasca selezionata, in questo caso la 1, viene erogata dagli ugelli portando il prodotto e la camera tutti alla stessa temperatura di equilibrio ovvero  $35^{\circ}\text{C}$ . Il passaggio dalla fase 1 alla fase 2 della ricetta avviene solo se viene superato per entrambe i valori di set fissati ( $TS1$  e  $TI1$ ). Questi sono indicativi del Cold Spot dei campioni posti a metà della diagonale del lato costituito da quattro ugelli del piano superiore e la corrispettiva posizione al piano inferiore. L'avanzamento del test dalla fase 1 alla fase 2 garantisce perciò che tutti i prodotti siano in equilibrio. La fase 2 è sostanzialmente la continuazione della fase 1, dato che per sette minuti si continua ad erogare la stessa acqua. Ciò serve a ristabilire l'equilibrio all'interno dei campioni in modo tale da annullare eventuali fenomeni di convezione naturale creatisi durante il riscaldamento dei campioni dalla temperatura ambiente a quella di set.

- 4) Passati i sette minuti inizia la fase 3, il vero e proprio trattamento termico. All'interno della camera del banco prova viene erogata l'acqua della vasca 2 che impone un determinato salto di temperatura. Nei primi minuti della fase la temperatura delle docce non sarà per nulla costante perché l'acqua andrà a scaldare sia il prodotto che tutto l'ambiente quindi questi istanti sono poco rappresentativi della prova. Quando la temperatura della doccia inizia ad essere costante si può considerare la temperatura raggiunta come quella effettiva della prova.
- 5) Al termine dei venti minuti il banco prova torna in stand by pronto per eseguire un altro test con le stesse condizioni al contorno.
- 6) Per poter verificare l'influenza della portata specifica diventa necessario regolare la valvola a saracinesca in modo tale che la portata nel test successivo sia diverso.
- 7) Una volta regolata la portata si ripercorre la stessa procedura ripartendo dal punto 1.

Nella Figura 4.3 è riportata la schermata principale con le impostazioni descritte per poter eseguire il test come descritto in precedenza.

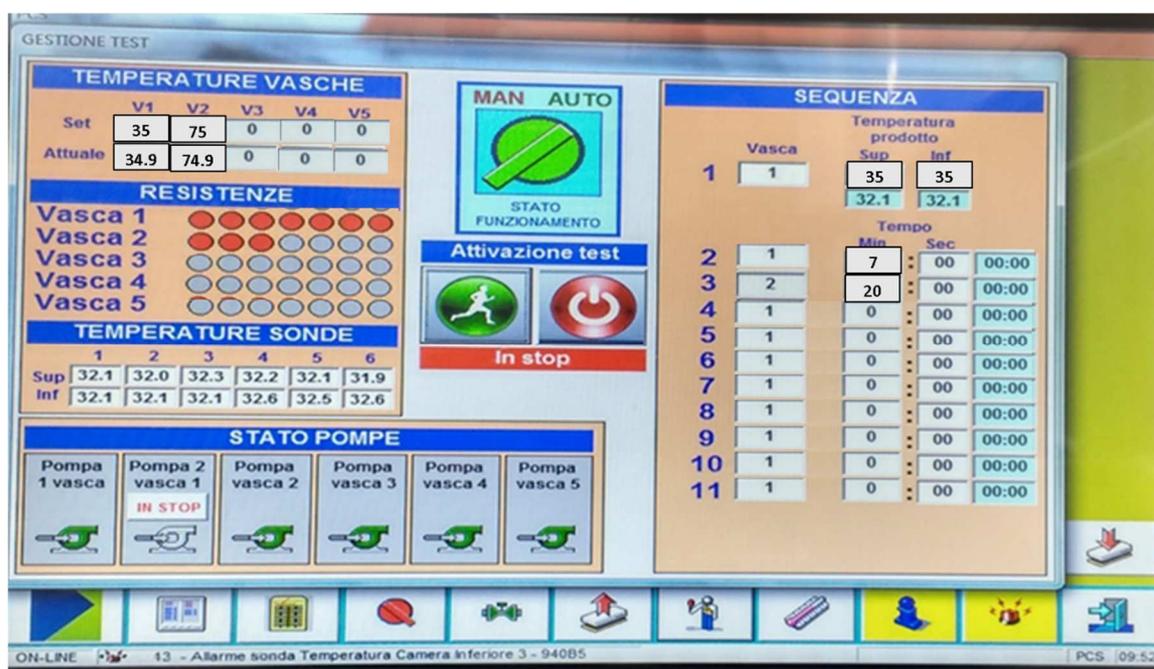


Figura 4.3 Schermata principale con la ricetta del test del riscaldamento del prodotto

Con la procedura il prodotto birra è stato testato nei vari formati commercializzati:

- Bottiglie di vetro da 330 ml e da 660 ml
- Lattine in alluminio da 330 ml e da 500 ml

#### **4.4 Risultati sperimentali dei test condotti sul prodotto birra**

Si andranno ora a presentare i risultati ottenuti con questa procedura in termini di  $DT_i$  in funzione della portata specifica  $Q_{spec}$  erogata all'interno della camera di prova per i tre campioni posizionati sul piano superiore e sul piano inferiore. Le analisi fanno riferimento alle temperature registrate durante il test al Cold Spot dei campioni.

##### **4.4.1 Birra nelle bottiglie di vetro da 330 ml**

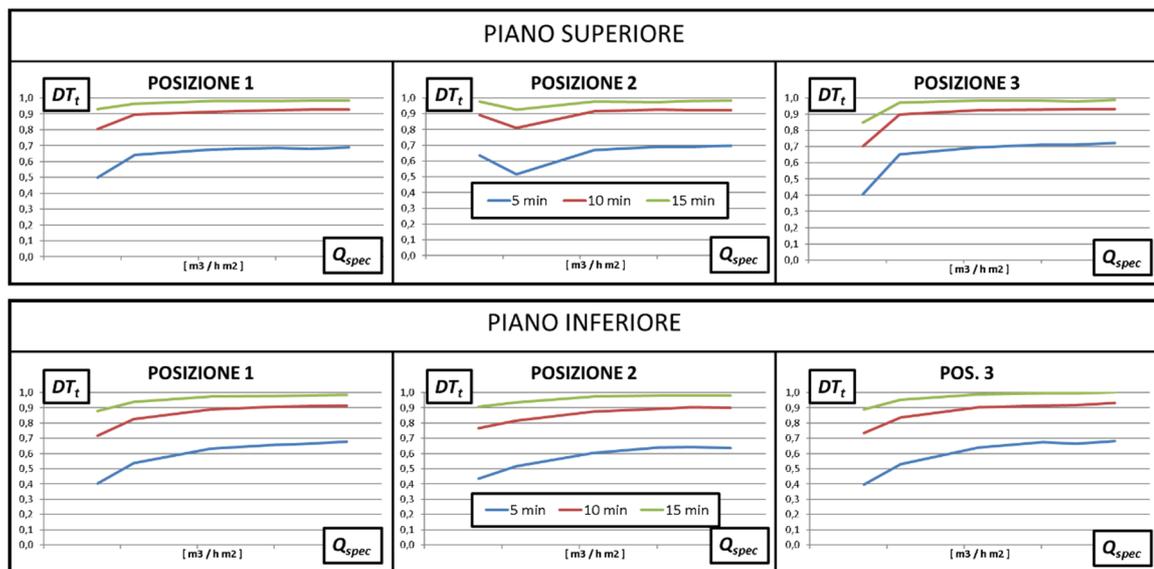
Il formato considerato in queste prove è quello riportato nelle foto di Figura 4.4 fatte durante la fase 3 dei veri test per il piano superiore e per il piano inferiore.



**Figura 4.4 Bottiglie in vetro da 330 ml di birra analizzate con test a diverse portate di acqua per le docce di trattamento termico**

Gli esiti dei test sono presentati nei grafici della Figura 4.5. I valori della portata specifica, sull'asse orizzontale, sono stati omessi dato che rappresentano dati sensibili per l'azienda presso la quale abbiamo condotto i test. Analizzando i trend del parametro  $DT_i$  calcolati per tre intervalli di tempo (dopo 5, 10 e 15 minuti del trattamento termico) si può comunque arrivare ad un paio di considerazioni evidenti:

- per quanto riguarda i trend della  $DT_t$  dei campioni analizzati al piano superiore, che se analizzati da soli identificano il comportamento di macchine a configurazioni single deck, si può dire che la Posizione 2 presenta il comportamento peggiore ed inoltre, oltre un certo valore di portata specifica, l'aumento del parametro è minimo e non tale, quindi, da giustificare un aumento della portata specifica erogata in camera che, per le macchine industriali, vuol dire un costo maggiore
- per quanto riguarda i trend della  $DT_t$  dei campioni analizzati al piano inferiore si può dire che le Posizioni hanno comportamento molto simili tra loro ed inoltre, come al piano superiore ma con un limite maggiore, oltre un certo un certo valore di portata specifica l'aumento del parametro è minimo, non tale quindi da giustificare l'aumento della portata che, per le macchine industriali vuol dire un costo eccessivo. Per l'applicazione double deck, quindi, la limitazione viene definita dal comportamento del prodotto al piano inferiore dove l'acqua arriva indirettamente dopo aver scambiato calore con il prodotto al piano superiore ed attraversa il piano di appoggio costituito dalle maglie di una catena di plastica.



**Figura 4.5 Trend della  $DT_t$  in funzione della  $Q_{spec}$  per i tre campioni di bottiglie in vetro da 330 ml di birra nelle 3 posizioni caratteristiche al piano superiore e al piano inferiore**

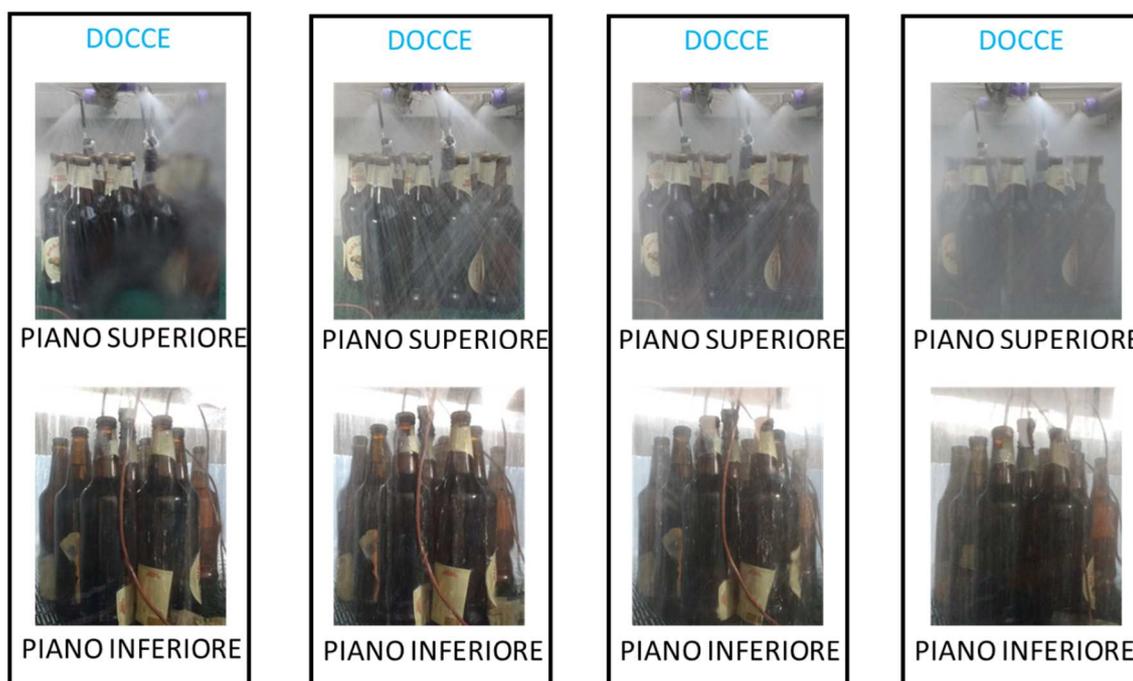
- una considerazione che si può fare sia per i trend della  $DT_t$  dei campioni del piano superiore che per i trend della  $DT_t$  dei campioni del piano inferiore riguarda la grande distanza tra l'andamento del parametro calcolato in un intervallo di tempo di cinque

minuti di trattamento termico e gli andamenti dello stesso parametro calcolato in un intervallo di tempo di dieci o quindici minuti.

#### **4.4.2 Birra nelle bottiglie di vetro da 660 ml**

Il formato considerato in queste prove è quello riportato nelle foto di Figura 4.6 fatte durante la fase 3 dei veri test per il piano superiore e per il piano inferiore.

Gli esiti dei test sono presentati nei grafici della Figura 4.7. I valori della portata specifica, sull'asse orizzontale, sono stati omessi dato che rappresentano dati sensibili per l'azienda presso la quale abbiamo condotto i test. Analizzando i trend del parametro  $DT_t$  calcolati per tre intervalli di tempo (dopo 5, 10 e 15 minuti del trattamento termico) si può comunque arrivare ad un paio di considerazioni evidenti:

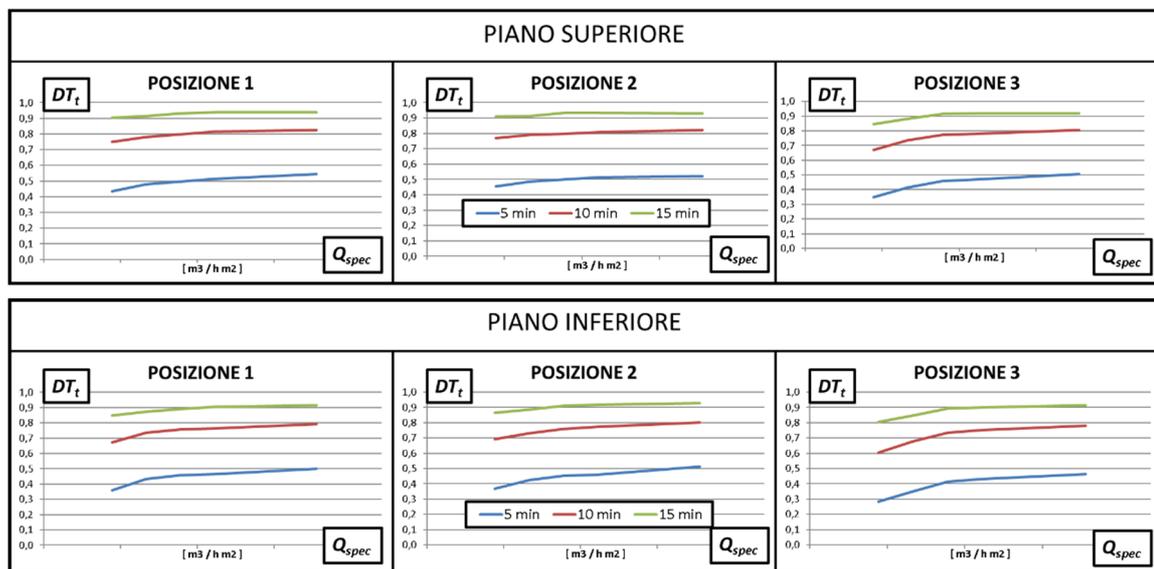


**Figura 4.6** Bottiglie in vetro da 660 ml di birra analizzate con test a diverse portate di acqua per le docce di trattamento termico

- per quanto riguarda i trend della  $DT_t$  dei campioni analizzati al piano superiore, che se analizzati da soli identificano il comportamento di macchine a configurazioni single deck, si può dire che le tre posizioni evidenziano sostanzialmente lo stesso comportamento inoltre, oltre un certo valore di portata specifica, l'aumento del

parametro è minimo e non tale, quindi, da giustificare un aumento della portata specifica erogata in camera che, per le macchine industriali, vuol dire un costo maggiore, come si era visto anche nel caso precedente

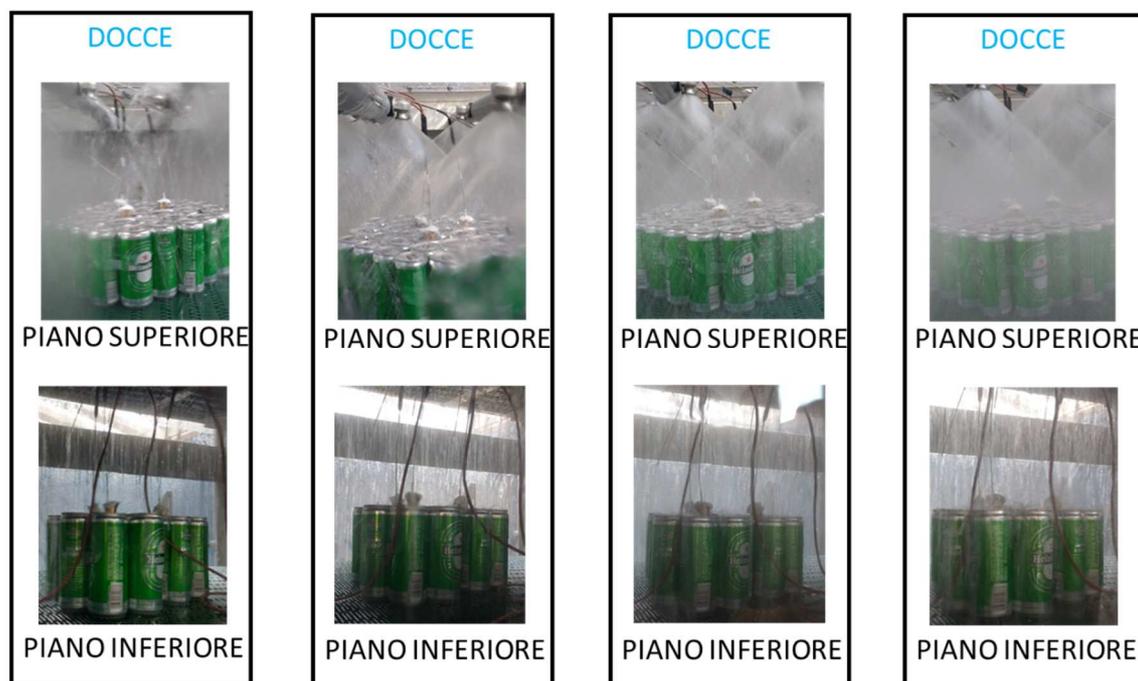
- per quanto riguarda i trend della  $DT_t$  dei campioni analizzati al piano inferiore si può dire che le tre posizioni hanno comportamento molto simili tra loro ed inoltre, come al piano superiore ma con un limite maggiore, oltre un certo valore di portata specifica l'aumento del parametro è minimo, non tale quindi da giustificare l'aumento della portata che, per le macchine industriali vuol dire un costo eccessivo. Per l'applicazione double deck quindi la limitazione viene definita dal comportamento del prodotto al piano inferiore dove l'acqua arriva indirettamente dopo aver scambiato calore con il prodotto al piano superiore ed attraversa il piano di appoggio costituito dalle maglie di una catena di plastica.
- anche per il formato maggiore della bottiglia in vetro, si può dire che sia per i trend della  $DT_t$  dei campioni del piano superiore che per i trend della  $DT_t$  dei campioni del piano inferiore la distanza tra l'andamento del parametro calcolato in un intervallo di tempo di cinque minuti di trattamento termico e gli andamenti dello stesso parametro calcolato in un intervallo di tempo di dieci o quindici minuti è elevata.



**Figura 4.7** Trend della  $DT_t$  in funzione della  $Q_{spec}$  per i tre campioni di bottiglie in vetro da 660 ml di birra nelle 3 posizioni caratteristiche al piano superiore e al piano inferiore

#### 4.4.3 Birra nelle lattine di alluminio da 330 ml

Il formato considerato in queste prove è quello riportato nelle foto di Figura 4.8 fatte durante la fase 3 dei veri test per il piano superiore e per il piano inferiore.



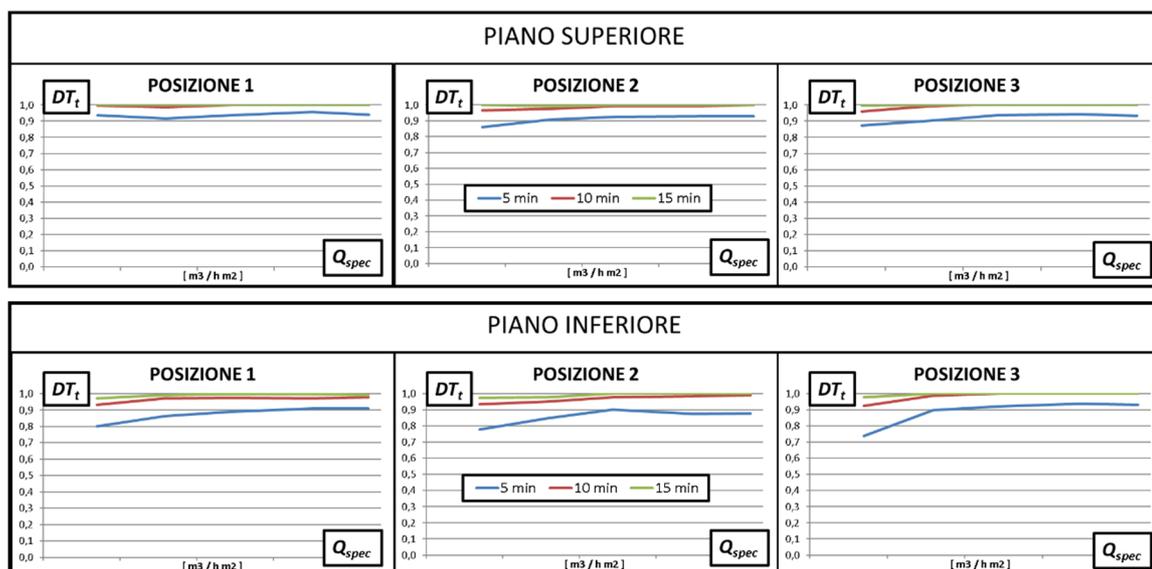
**Figura 4.8 Lattine in alluminio da 330 ml di birra analizzate con test a diverse portate di acqua per le docce di trattamento termico**

Gli esiti dei test sono presentati nei grafici della Figura 4.9. **L'origine riferimento non è stata trovata.** I valori della portata specifica, sull'asse orizzontale, sono stati omessi dato che rappresentano dati sensibili per l'azienda presso la quale abbiamo condotto i test. Analizzando i trend del parametro  $DT_t$  calcolati per tre intervalli di tempo (dopo 5, 10 e 15 minuti del trattamento termico) si può comunque arrivare ad un paio di considerazioni evidenti:

- per quanto riguarda i trend della  $DT_t$  dei campioni analizzati al piano superiore, che se analizzati da soli identificano il comportamento di macchine a configurazioni single deck, si può dire che le tre posizioni evidenziano sostanzialmente lo stesso comportamento anche se la Posizione 2, alle basse portate evidenzia un calo. Inoltre, l'andamento del parametro è praticamente costante o comunque contenuto nell'intervallo di confidenza di 0.04 del valore medio della  $DT_t$ . Tale intervallo di confidenza deriva da una analisi dei dati specifica fatta in funzione dei valori dei dati ritenuti sensibili e quindi non esplicitati. Quindi, la variazione di portata specifica

erogata in camera non determina una netta variazione del processo di scambio termico per questo tipo di prodotto

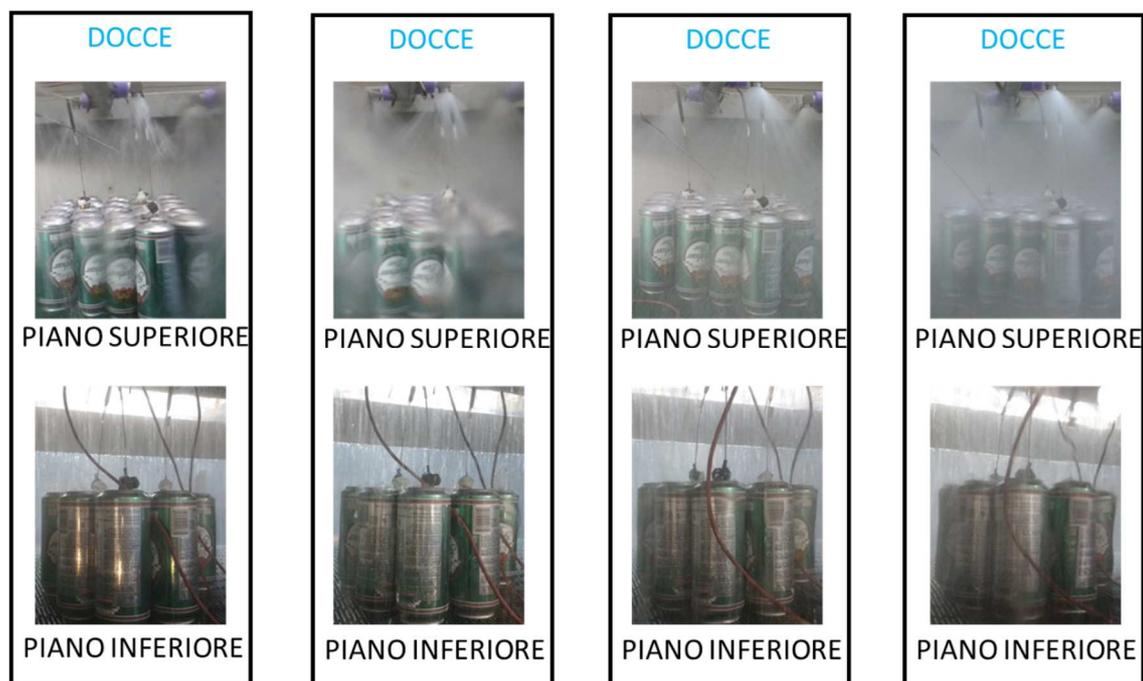
- per quanto riguarda i trend della  $DT_t$  dei campioni analizzati al piano inferiore si può dire oltre un certo valore di portata specifica l'aumento del parametro è minimo, non tale quindi da giustificare l'aumento della portata che, per le macchine industriali vuol dire un costo eccessivo. Anche in per questo formato, per l'applicazione double deck quindi la limitazione in termini di portata specifica viene definita dal comportamento del prodotto al piano inferiore dove l'acqua arriva indirettamente dopo aver scambiato calore con il prodotto al piano superiore e ed attraversa il piano di appoggio costituito dalle maglie di una catena di plastica.
- per quanto riguarda il caso di lattine in alluminio si può dire che sia per i trend della  $DT_t$  dei campioni del piano superiore che per i trend della  $DT_t$  dei campioni del piano inferiore la distanza tra l'andamento del parametro calcolato in un intervallo di tempo di cinque minuti di trattamento termico e gli andamenti dello stesso parametro calcolato in un intervallo di tempo di dieci o quindici minuti è molto meno elevata dei casi di bottiglie in vetro. Inoltre, i valori sono superiori allo 0.8. Ciò significa che, la variazione di formato e di materiale del contenitore influenza positivamente decisamente lo scambio di calore all'interno del contenitore stesso.



**Figura 4.9** Trend della  $DT_t$  in funzione della  $Q_{spec}$  per i tre campioni di lattine in alluminio da 330 ml di birra nelle 3 posizioni caratteristiche al piano superiore e al piano inferiore

#### 4.4.4 Birra nelle lattine di alluminio da 500 ml

Il formato considerato in queste prove è quello riportato nelle foto di Figura 4.10 fatte durante la fase 3 dei veri test per il piano superiore e per il piano inferiore.



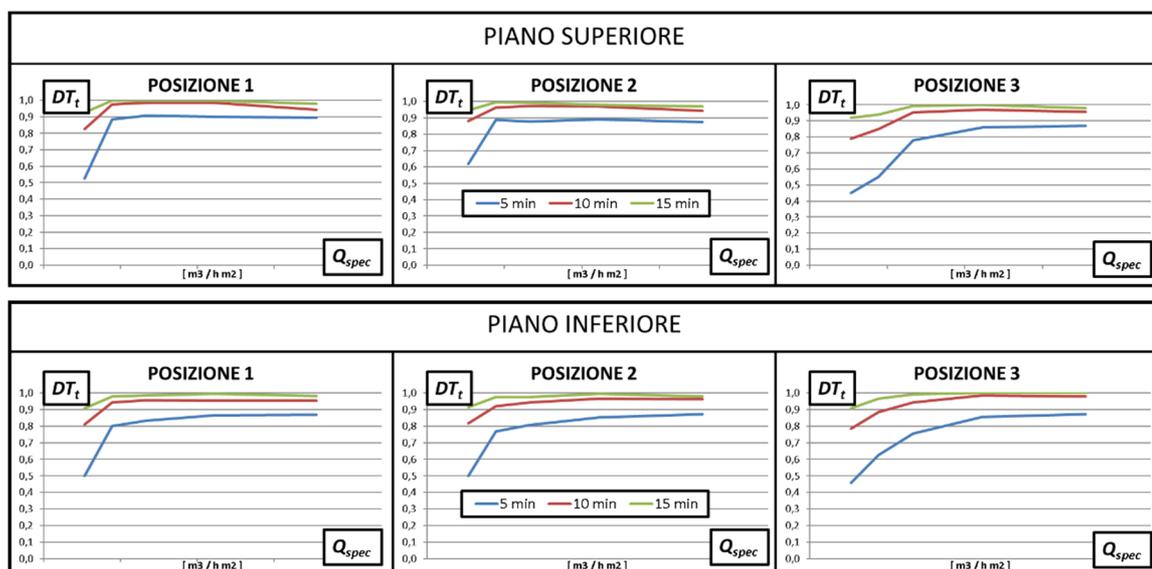
**Figura 4.10 Lattine in alluminio da 500 ml di birra analizzate con test a diverse portate di acqua per le docce di trattamento termico**

Gli esiti dei test sono presentati nei grafici della Figura 4.11 **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata..** I valori della portata specifica, sull'asse orizzontale, sono stati omessi dato che rappresentano dati sensibili per l'azienda presso la quale abbiamo condotto i test. Analizzando i trend del parametro  $DT_t$  calcolati per tre intervalli di tempo (dopo 5, 10 e 15 minuti del trattamento termico) si può comunque arrivare ad un paio di considerazioni evidenti:

- per quanto riguarda i trend della  $DT_t$  dei campioni analizzati al piano superiore, che se analizzati da soli identificano il comportamento di macchine a configurazioni single deck, si può dire che oltre un certo un certo valore di portata specifica l'aumento del parametro è minimo, non tale quindi da giustificare l'aumento della portata che, per le macchine industriali vuol dire un costo eccessivo. La posizione con comportamento peggiore, però è la posizione 3, ovvero quella in cui il prodotto

viene a trovarsi in un vertice del “quadrato” formato da quattro ugelli ovvero il prodotto si trova esattamente sotto uno degli ugelli

- per quanto riguarda i trend della  $DT_t$  dei campioni analizzati al piano inferiore si può dire oltre un certo valore di portata specifica l’aumento del parametro è minimo, non tale quindi da giustificare l’aumento della portata che, per le macchine industriali vuol dire un costo eccessivo. Il parametro è diverso tra piano superiore e piano inferiore quindi, per l’applicazione double deck, la limitazione in termini di portata specifica viene definita dal comportamento del prodotto al piano inferiore dove l’acqua arriva indirettamente dopo aver scambiato calore con il prodotto al piano superiore ed attraversa il piano di appoggio costituito dalle maglie di una catena di plastica.



**Figura 4.11 Trend della  $DT_t$  in funzione della  $Q_{spec}$  per i tre campioni di lattine in alluminio da 500 ml di birra nelle 3 posizioni caratteristiche al piano superiore e al piano inferiore**

- per quanto riguarda il caso di lattine in alluminio si può dire che sia per i trend della  $DT_t$  dei campioni del piano superiore che per i trend della  $DT_t$  dei campioni del piano inferiore la distanza tra l’andamento del parametro calcolato in un intervallo di tempo di cinque minuti di trattamento termico e gli andamenti dello stesso parametro calcolato in un intervallo di tempo di dieci o quindici minuti è molto meno elevata dei casi di bottiglie in vetro. Inoltre, i valori della  $DT_t$  oltre il livello di soglia sono superiori allo 0.8. Ciò significa che, la variazione di formato e di materiale del contenitore influenza positivamente decisamente lo scambio di calore all’interno del contenitore stesso.

## **4.5 Conclusioni e Osservazioni**

Analizzando i risultati ottenuto con i vari test sul prodotto birra nei quattro formati classici si può concludere che:

- l'efficienza dello scambio termico globale, dato dalla somma di tre contributi, ovvero convezione forzata esterna tra pioggia e contenitore, conduzione attraverso le pareti del contenitore e convezione naturale all'interno del contenitore stesso è fortemente influenzata dalla conduzione poiché il materiale e lo spesso del contenitore influiscono molto sul coefficiente di scambio termico. Per questo motivo, i valori limite di portata specifica erogata in camera oltre i quali la  $DT_t$  non aumenta in maniera consistente sono diversi tra lattine in alluminio e bottiglie in vetro. Anche se non vengono riportati i dati sensibili ottenuti nei test, i trend mettono in evidenza questo dato che, in ambito industriale, porta a definire design di macchina a tunnel per la pastorizzazione con specifiche costruttive diverse in base al prodotto che la linea a deve sottoporre al trattamento termico di pastorizzazione.
- le applicazioni single deck e double deck per tutti i formati presentano valori limite di portata specifica erogata in camera oltre i quali la  $DT_t$  non aumenta in maniera consistente diversi. Questo implica che la scelta tra le due configurazioni andrà fatta sia in funzione del numero di campioni che la linea deve elaborare per unità di tempo ma anche in base all'efficienza e al risparmio energetico che le due diverse configurazioni presentano.
- i dati raccolti durante le prove in laboratorio hanno trovato riscontro con i dati che l'azienda ha raccolto in campo per anni di applicazioni industriali i quali però non erano stati messi in relazione. In questo modo si potrà ottimizzare lo scambio termico in funzione del tipo di prodotto e del tipo di contenitore elaborato. Il banco prova è stato quindi dimensionato e costruito in maniera corretta, le strumentazioni installate permettono di ottenere tutti i dati necessari per trarre le conclusioni volute e la gestione delle prove ha permesso di creare dei database utili sia in fase di progettazione interna all'azienda sia in fase di proposta per le possibili aziende interessate a questo tipo di macchine industriali
- analizzando tutti i test condotti risulta che il comportamento peggiore lo presenta il campione posto nella Posizione 2, ovvero quella in cui il prodotto viene a trovarsi a metà del lato del "quadrato" costituito da quattro ugelli. Effettivamente si tratta del punto geometricamente più distante dalla fonte di calore principale all'interno della camera (l'ugello che spruzza l'acqua sotto forma di pioggia). Questo dato permette

anche di ragionare sull'uniformità di trattamento del pattern installato nella macchina: peggiore sarà il comportamento del campione posto in questa posizione e meno consigliabile sarà la configurazione di pattern scelta. Dato che le nuove specifiche in termici di pattern (passo dei tubi portaugelli e passo degli ugelli) sono dati sensibili non risulta conveniente per l'azienda rendere pubblici i risultati ma il banco prova, per come è stato studiato e costruito, ha dato la possibilità di ragionare anche su questo tipo di scelta. Per fare ciò sono stati condotti test analoghi a quelli presentati e sono stati poi analizzati i trend della  $DT_t$  per i vari formati e per i due piani su cui erano posizionati i campioni.

I dati ottenuti e le ottime soluzioni tecniche hanno trovato riscontro nelle applicazioni pratiche delle macchine per la pastorizzazione a tunnel. Infatti, hanno permesso di costruire macchine energeticamente più efficienti e quindi più competitive sul mercato. Avendo a disposizione quindi lo strumento adatto per analizzare questo tipo di trattamento termico si è deciso di intraprendere anche una campagna di analisi di prodotti il cui settore non era conosciuto ed esplorato come quello della birra.

# Capitolo 5

## Analisi sperimentale dei processi di pastorizzazione per i prodotti del gruppo succhi di frutta

### 5.1 Definizione del prodotto succo di frutta sottoposto a trattamento termico

Il processo di trattamento termico di pastorizzazione, come visto nei capitoli precedenti, può essere applicato a molti prodotti alimentari per poterne aumentare il periodo di conservazione dato l'effetto battericida. La maggior parte delle bevande alimentari subisce questo tipo di trattamento termico dato che ne aumenta la vita utile. In particolar modo la categoria denominata come succhi di frutta.

Per definizione, il succo di frutta è il prodotto risultante dalla lavorazione dei frutti, che, alla fine del processo produttivo, mantiene l'aroma ed il gusto del prodotto dal quale proviene. Il succo di frutta generalmente contiene acqua, zuccheri, acidi organici, sali minerali e molte vitamine. I succhi di frutta sono una tipologia ben definita di prodotto, regolamentata da un apposito D.P.R. del 1982 e da successivi decreti ministeriali (1992 e 1996). Vengono definite ben cinque categorie di questo tipo di prodotto:

- **succo di frutta:** prodotto che deve essere costituito da frutta al 100% e può prevedere opzionalmente l'aggiunta di zucchero; nel caso di succhi concentrati o disidratati, parte dell'acqua contenuta nel succo viene eliminata; nel caso venga aggiunto lo zucchero, la legge prevede che sia esplicitamente indicato con la menzione “zuccherato” accanto alla denominazione
- **spremuta:** il termine si applica solo agli agrumi e indica il succo di agrumi, con e senza zuccheri aggiunti
- **nettare di frutta:** simile al succo di frutta, la percentuale di succo di frutta minima scende al 50% a cui sono aggiunti zucchero e acqua; la percentuale minima di frutta deve essere indicata all'esterno del contenitore
- **bevande analcoliche alla frutta:** la percentuale di succo di frutta minima scende al 12% a cui sono aggiunti zucchero e acqua la percentuale minima di frutta deve essere indicata all'esterno del contenitore
- **bevanda al gusto di:** si tratta di quei prodotti nei quali la percentuale di frutta risulta inferiore al 12%

La differenza sostanziale tra questi prodotti e il prodotto di cui l'azienda Sidel ha tanta esperienza, ovvero la birra, è che questi vengono imbottigliati a caldo. Infatti, il processo che viene definito Hot Fill prevede temperature di lavoro dei fluidi comprese tra gli 80°C e i 90°C. Questi quindi non devono subire un intero ciclo di pastorizzazione, dato che la loro temperatura si trova già al di sopra dei 60° C, temperatura di riferimento oltre la quale il prodotto deve essere portato per poter inibire l'azione dei microorganismi che determinano un veloce deterioramento del prodotto. Ciò semplifica di molto il trattamento termico che deve essere eseguito alla fine del ciclo di produzione. Una volta che questi fluidi vengono imbottigliati ad alta temperatura devono poi subire solo un abbattimento o cooling. Si tratta del processo di scambio termico esattamente opposto a quello descritto nel capitolo precedente ma di fatto la dinamica è la stessa. Le docce esterne vengono erogate dagli ugelli con una temperatura più bassa di quella del prodotto. L'acqua, che formerà un film sulla parete esterna dei contenitori, scambia calore per convezione forzata con il prodotto stesso. Per conduzione il calore uscirà attraverso le pareti del contenitore. Di quello che succede all'interno del campione però, non lo si può affermare a priori. Lo scambio di calore potrà essere per convezione naturale, per conduzione o per un processo ibrido. Ciò dipende dalle caratteristiche fisiche del fluido. I parametri fisici che caratterizzano i fluidi alimentari delle categorie soprariportate possono essere molteplici e, in base alla fase di produzione, hanno diversa importanza. Come primo approccio i fluidi alimentari considerati negli studi condotti

sempre presso i laboratori dell'azienda e con lo stesso banco prova descritto nei capitoli precedenti sono stati caratterizzati in funzione di:

- **percentuale di polpa:** quantità di polpa del frutto di origine utilizzato per realizzare la soluzione acquosa; si tratta della prima informazione messa a disposizione sul fluido da trattare dato che è direttamente indicata nei contenitori della sostanza stessa
- **viscosità dinamica:** grandezza fisica che misura la resistenza di un fluido allo scorrimento; se non è conosciuta per precedenti studi, va determinata la curva caratteristica della viscosità dinamica in funzione della velocità di taglio; per fare ciò sono necessarie strumentazioni di laboratorio dedicate e conoscenza nel poterle usare
- **grado brix:** misura delle sostanze allo stato solido dissolte nel liquido, un grado Brix corrisponde a 1 parte di sostanza solida in 99 parti di soluzione; è misurabile grazie all'utilizzo di un rifrattometro direttamente nel luogo in cui vengono fatte le prove sperimentali
- **densità:** rapporto tra la massa e il volume del fluido.

Per quanto riguarda i prodotti alimentari, inoltre, il punto da tenere in considerazione per il dimensionamento del raffreddatore a tunnel è il centro geometrico del contenitore e non il Cold spot come nel caso del prodotto birra, come ben spiegato nei vari studi trovati in letteratura, ad esempio (Liga, et al., 2016). Ciò è dovuto al diverso processo fisico di scambio di calore. Per quanto riguarda i cibi solidi, infatti, va considerata la storia termica al centro geometrico del contenitore dato che scambieranno calore principalmente per conduzione al loro interno perciò il punto più sfavorito è quello più difficile da raggiungere e, quindi, più distante dalle pareti. Data la geometria simmetrica dei contenitori, a sezione quadrata o rettangolare, oppure data la geometria assialsimmetrica dei contenitori a sezione cilindrica, il punto che impiegherà il maggior tempo per poter scambiare calore sarà appunto il geometrico del volume sottoposto al processo termico (Centro Geometrico).

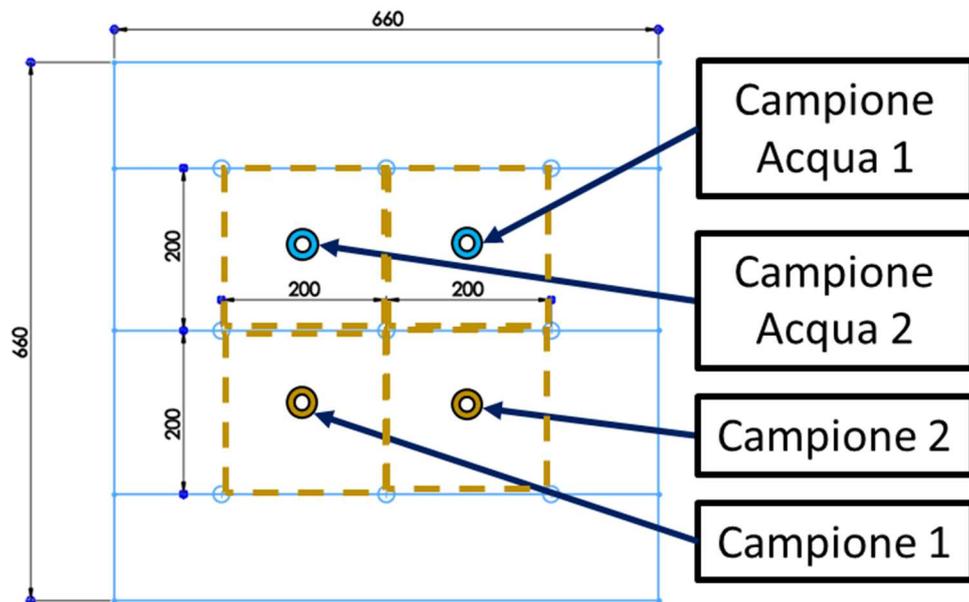
## **5.2 Descrizione della procedura del test nella camera di prova**

Al contrario del prodotto birra, le conoscenze nel settore succhi di frutta dell'azienda sono limitate dato che si tratta di una fetta di mercato in via di sviluppo. Per ottenere una buona conoscenza degli effetti del processo che il prodotto dovrebbe subire durante il trattamento termico di raffreddamento è stato quindi scelto di sviluppare sia un modello numerico, presentato nel secondo capitolo della tesi (vedi il paragrafo 2.6 Modelli numerici

per il processo di raffreddamento), che un banco prova per affiancare alla ricerca numerico la verifica sperimentale. All'interno del laboratorio dell'azienda coinvolta nella collaborazione, Sidel, è stato realizzato e messo in opera il banco prova descritto dettagliatamente nel capitolo precedente.

### **5.2.1 Posizionamento dei campioni sul piano della camera di prova**

Il banco prova è stato studiato in modo tale che possa riprodurre il trattamento termico di pastorizzazione realizzato con macchina a tunnel. Il modulo riproduce il funzionamento completo di una macchina a tunnel permettono il trattamento del prodotto grazie all'utilizzo di piogge che, in base alla temperatura imposta, scaldano o raffreddano gradualmente il prodotto. Data la configurazione della camera di prova, sul piano, per questo tipo di test è stato scelto di inserire quattro campioni con al loro interno tre sonde per il monitoraggio della temperatura. Sapendo che la posizione nel piano che, quando la macchina lavora a regime, riporta le peggiori prestazioni in termini di scambio termico è quella che nei test precedenti è stata definita come Posizione 1, i campioni da testare sono stati messi in quattro Posizioni 1 omologhe nel piano. Si tratta della posizione in cui il campione viene a trovarsi sulla metà della diagonale del "quadrato" formato da quattro ugelli, posti due su un tubo e due su un altro tubo porta ugelli, e, per come è stata studiata la camera, si hanno più posizioni omologhe di questo tipo. Dato che i test devono dare informazioni di come cambiano le prestazioni della macchina in funzione del prodotto sottoposto a trattamento termico, si è deciso di inserire nella camera di prova sempre due campioni del succo di frutta da testare in due formati diversi e due campione dello stesso formato contenente acqua, come viene rappresentato dalla Figura 5.1. In questo modo, tutti i dati relativi a fluidi alimentari con comportamento da analizzare saranno messi in rapporto ad un fluido dal comportamento noto e ben catalogato durante gli anni presso il laboratorio dell'azienda. Infatti, il prodotto birra ha riportato le stesse caratteristiche del fluido acqua durante le varie campagne di prova condotto negli anni passati, dalle quali sono state raccolte tutte le informazioni necessarie.



**Figura 5.1** Schema dei “quattro quadrati”, definiti dalla linea tratteggiata, formati da quattro ugelli e posizioni in cui vengono posti i campioni di succo e quello contenente acqua nel piano superiore della camera di prova

### **5.2.2 Strumentazione dei campioni da sottoporre ai test**

Per poter raccogliere la maggior parte di dati termici di ogni campione, si è deciso di inserire tre sonde di tipo “T” all’interno di ogni campione sottoposto alla prova di raffreddamento all’interno della camera. I tre punti monitorati sono stati:

- **Centro Geometrico:** in base alla geometria del campione, si definisce una altezza a cui fissare la sonda in modo tale che registri la temperatura in corrispondenza dell’asse del campione e ad una altezza che rappresenti il centro geometrico del campione.
- **Cold Spot:** si tratta dello stesso punto indicato nelle analisi dei campioni del prodotto birra ovvero il punto con dinamica più lento in fase di riscaldamento che viene preso a riferimento nella misura delle Unità di Pastorizzazione; nel caso del raffreddamento dei succhi di frutta il Cold Spot diventa il punto più veloce a raffreddarsi data la dinamica inversa a quella del riscaldamento delle ipotetiche celle convettive; la scelta di monitorare questo punto, anche se non rappresenta il punto più sfavorito durante il processo termico, è legata alla decisione di avere informazioni da poter confrontare con quelle già in possesso per il prodotto birra

- **Punto Intermedio** tra i due punti precedenti: onde evitare di perde fenomeni particolari o non previsti si è deciso di ricavare informazioni in merito alla temperatura del fluido durante il processo di abbattimento termico anche in un punto che si trova alla stessa distanza tra il Centro Geometrico del contenitore e il Cold spot.

La procedura di strumentazione dei vari campioni è la stessa riportata nel paragrafo 4.2.2 Strumentazione dei campioni da sottoporre ai test del capitolo precedente. In questo caso la procedura viene ripetuta per tutte le sonde che andranno a formare delle triplete. Queste, fissate poi allo stelo del tappo portasonda, saranno inserite nei quattro campioni sottoposti all'abbattimento di temperatura.

La scelta del formato dei formati da prendere in considerazione e dei succhi di frutta da analizzare è stata fatta sulla base dei risultati di una analisi di mercato fatta dall'azienda Sidel in modo tale da avere, alla fine della campagna di test condotta, la maggior parte delle informazioni possibili da poter usare per il dimensionamento di macchine a tunnel per l'abbattimento della temperatura. Per prendere una decisione si è tenuto presente che questo tipo di sostanze alimentari vengono imbottigliate ad alte temperature perciò i contenitori devono essere del materiale adeguato. I formati scelti, riportati nella Figura 5.2, sono stati, quindi, contenitori in PET adatti per linee hot fill con:

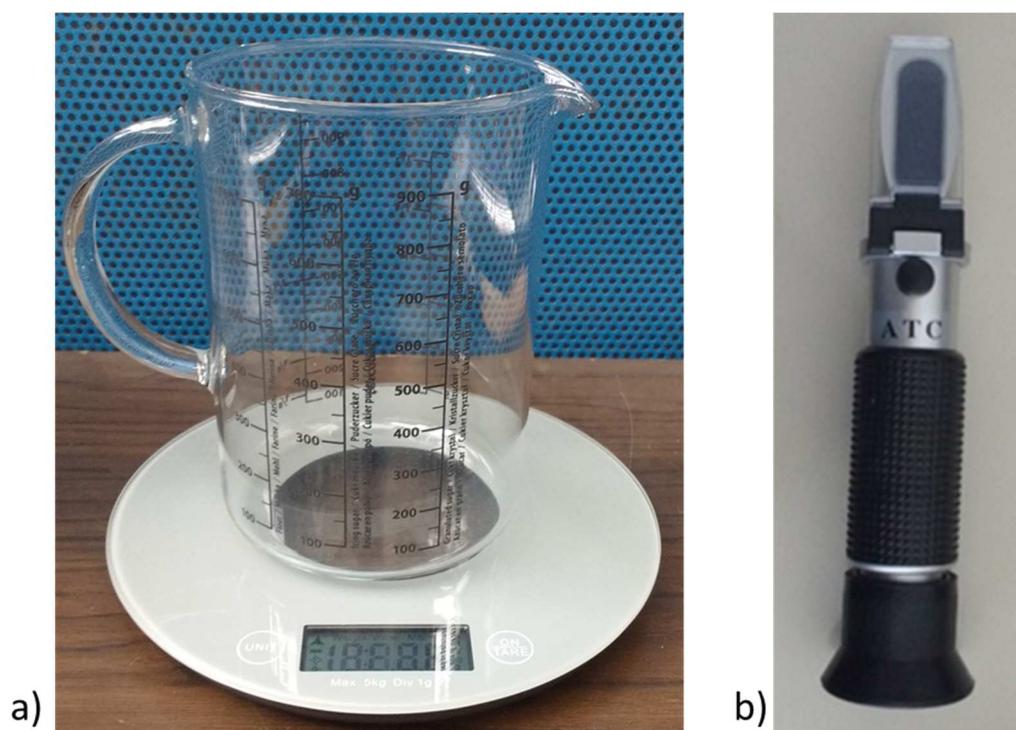
- sezione quadrata l=80 mm e volume 1500 ml
- sezione circolare d=88 mm e volume 1200 ml
- sezione circolare d=72 mm e volume 750 ml
- sezione quadrata l=58 mm e volume 500 ml



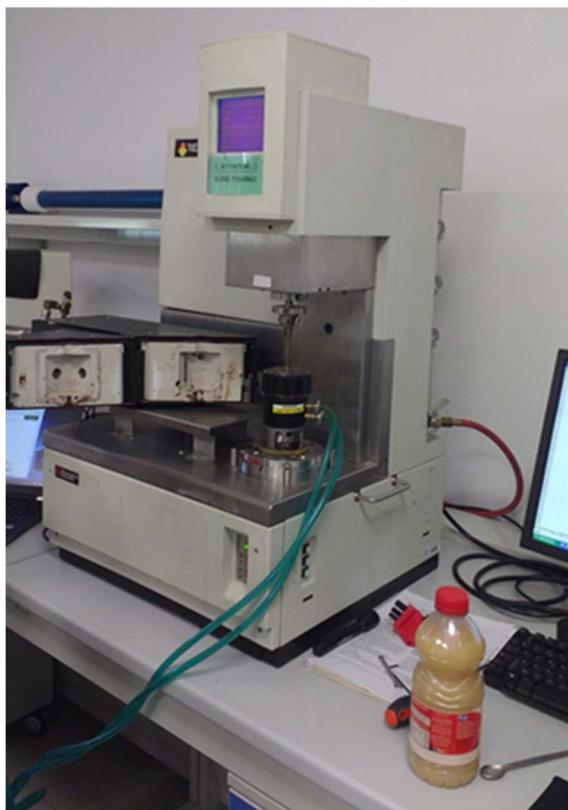
**Figura 5.2** Bottiglie in PET utilizzate durante i test

### **5.2.3 Definizione delle variabili da verificare durante il test**

Dato che si vuole esplorare un campo sconosciuto, per questi test la variabile principale è rappresentata dal comportamento del fluido stesso. Come detto, la scelta dei succhi di frutta da prendere in considerazione è stata fatta sulla base dei risultati di una analisi di mercato fatta dall'azienda Sidel in modo tale da avere, alla fine della campagna di test condotta, la maggior parte delle informazioni possibili da poter usare per il dimensionamento di macchine a tunnel per l'abbattimento della temperatura. La caratteristica del fluido principalmente considerata è stata la percentuale di polpa che, come è stato spiegato, caratterizza la divisione in categorie dei vari fluidi alimentari. Per trovare altre relazioni tra le grandezze fisiche caratterizzanti il fluido e il suo comportamento sono state poi anche misurate densità, grado brix e viscosità dinamica. Per le prime due sono bastate semplici misure eseguite durante i test in laboratorio grazie a una bilancia, un bicchiere graduato e un rifrattometro ottico, le foto degli strumenti utilizzati sono riportate nella Figura 5.3. Invece, per ricavare la curva di viscosità dinamica, in funzione della velocità di taglio, è stata necessaria una campagna di misure eseguite presso i laboratori accreditati per questo tipo di misura dell'Università di Ferrara che dispone di un reometro, vedi Figura 5.4.



**Figura 5.3 Strumenti utilizzati durante i test presso il laboratorio in azienda a) bilancia e bicchiere graduato; b) rifrattometro ottico**



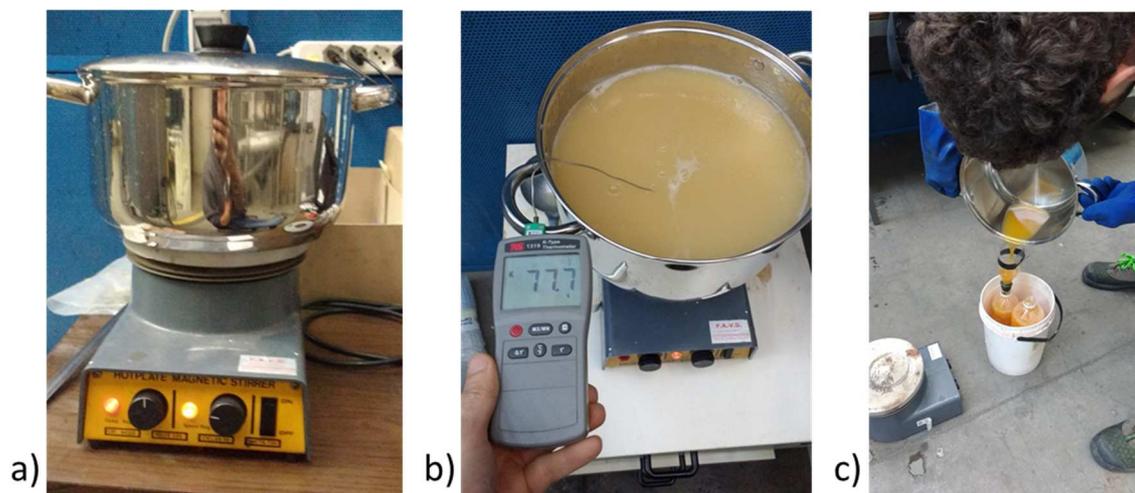
**Figura 5.4 Reometro dell'università degli Studi di Ferrara utilizzato per la definizione della viscosità dinamica in funzione della velocità di taglio**

La portata specifica utilizzata durante i test di raffreddamento non è stata fatta variare. Il valore scelto è quello classico utilizzato per la progettazione di macchina a tunnel per la pastorizzazione del prodotto birra. Le valvole sono state impostate in modo tale che l'acqua venga erogata dagli ugelli posti sul tetto della camera di prova del piano superiore, configurazione single deck, con sempre lo stesso valore durante tutti i test.

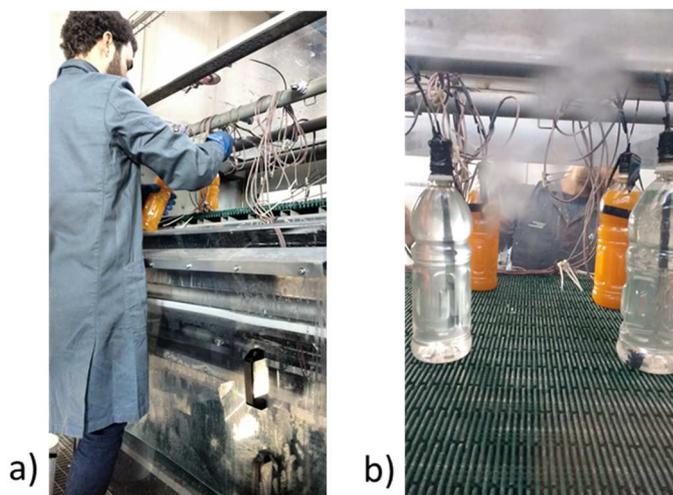
### **5.3 Test di raffreddamento dei succhi di frutta**

I test di raffreddamento dei vari succhi sono stati condotti partendo con i fluidi ad una temperatura compresa tra gli 80°C e gli 85°C. Per portare la quantità di fluido alimentare necessaria in questo range di temperatura è stato utilizzato un sistema di riscaldamento esterno al banco di prova formato da un contenitore e una piastra induttiva, Figura 5.5 a). In base alla misura della temperatura, Figura 5.5 b), quando i fluidi alimentari raggiungono il range definito vengono messi nei vari contenitori, Figura 5.5 c). Successivamente, i campioni vengono messi il prima possibile nella camera di prova e sigillati con il tappo portasonda con la tripletta di sonde già fissate all'altezza corretta, Figura 5.6 a). e b).

Contemporaneamente vengono inseriti nella camera di prova anche i campioni nel formato omologo ma riempiti di acqua, Figura 5.6 b).



**Figura 5.5 Fasi di preparazione dei campioni dei succhi di frutta: a) riscaldamento, b) misura della temperatura del fluido alimentare, c) imbottigliamento**



**Figura 5.6 a) Posizionamento delle sonde nei campioni e b) dei campioni sul piano della camera di prova**

Per i test di raffreddamento dei fluidi alimentari è stata scelta una sequenza di quattro abbattimenti consecutivi della durata di cinque minuti. I test eseguiti hanno seguito la seguente procedura:

- 1) Si decide di simulare la configurazione single deck con erogazione dell'acqua al piano superiore con il pattern descritto in precedenza.
- 2) Si imposta la ricetta del test fissando i parametri, come viene riportato nella Figura 5.7:
  - a. temperatura vasca 1, TV1= 85°C
  - b. temperatura vasca 2, TV2=68°C
  - c. temperatura vasca 3, TV3= 50°C
  - d. temperatura vasca 4, TV4= 42°C
  - e. temperatura vasca 5, TV5= 34°C
  - f. temperatura di soglia del prodotto, TS1=TI1=82.5°C
  - g. durata in termini di tempo della fase 2, t=5'.
  - h. durata in termini di tempo della fase 3, t=5'
  - i. durata in termini di tempo della fase 4, t=5'
  - j. durata in termini di tempo della fase 5, t=5'
- 3) Se le temperature di soglia per i campioni del fluido alimentare è rispettata, il plc consente di attivare la seconda fase definita nella ricetta. Si tratta del primo raffreddamento. Le temperature di raffreddamento hanno una differenza di 8°C l'una dell'altra e una durata standard di cinque minuti.
- 4) Alla fine delle quattro fasi di abbattimento il plc mette in stand by il banco prova e scrive il file di test della prova con tutte le informazioni:
  - tipologia di prodotto
    - formato del contenitore (1500ml, 1200ml, 750ml,500ml)
    - materiale del contenitore (PET)
    - tipo di fluido (quale succo di frutta)
    - temperatura iniziale del prodotto
  - configurazione del banco prova
    - single deck
    - pattern installato
    - tipologia di ugelli installati
    - distanza tra i tubi portaugelli e il piano di appoggio della camera di prova
    - portata erogata in camera
  - durata totale della prova
    - e poi, con intervallo di dieci secondi:
  - il numero della vasca da cui viene prelevata l'acqua erogata
  - le dodici temperature rilevate dalle sonde "T"

- le temperature delle cinque vasche
- i livelli delle cinque vasche
- la temperatura dell'acqua erogata
- la portata dell'acqua erogata
- le pressioni rilevate sui tubi portaugelli

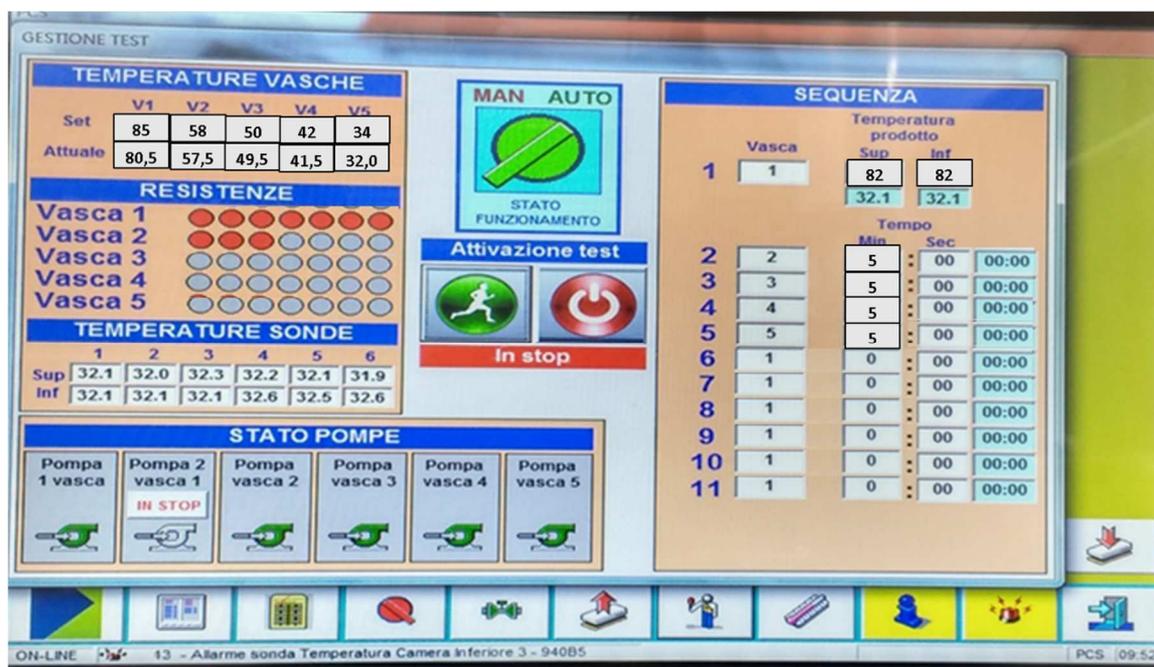


Figura 5.7 Schermata principale con la ricetta del test del raffreddamento del prodotto

## 5.4 Risultati sperimentali dei test condotti sui prodotti succhi di frutta

La variabile principale in questo tipo di test è rappresentata quindi dal tipo di succo di frutta considerato identificato dalle sue caratteristiche fisiche. La ricerca ha preso in considerazione una vasta gamma di prodotti in modo da poter allargare il range di analisi il più possibile ma andando a considerare comunque il loro peso nelle applicazioni industriali. I fluidi alimentari e le loro caratteristiche fisiche sono stati riportati nella Tabella 5.1. La viscosità dinamica riportata in tabella è quella misurata ad una velocità di taglio di  $100 \text{ s}^{-1}$ . Questa scelta è stata dettata dal fatto che, nelle applicazioni industriali tutte le macchine a tunnel di raffreddamento, dove il fluido è fermo e imbottigliato, sono precedute da macchine di riempimento che lavorano con il fluido che scorre a grandi velocità attraverso i tubi. Per poter trovare, in un secondo momento, un punto di contatto con le altre macchine della filiera

si è cercato di rendere i dati raccolti il più generici possibile. La misura, inoltre, è stata riportata con due unità di misura diverse perché quella del sistema internazionale (Pa\*s) è poco usata nella pratica.

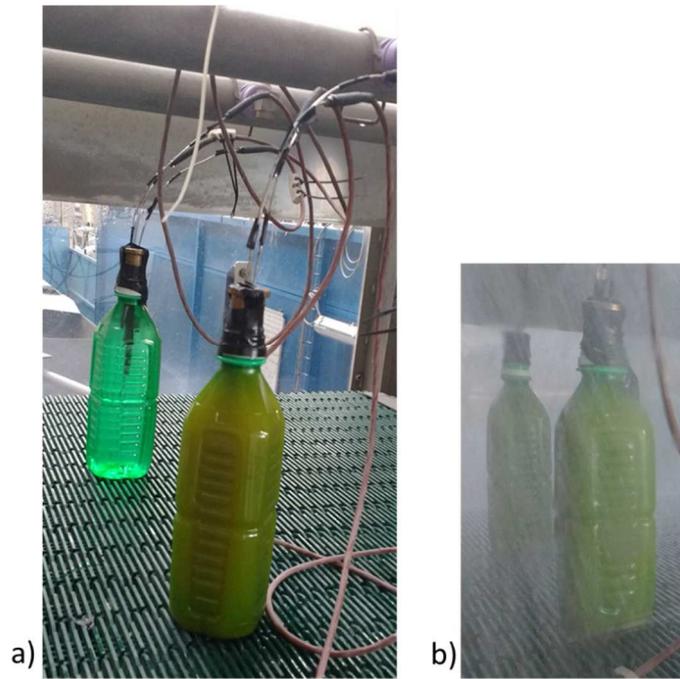
**Tabella 5.1 Tabella con tutti i fluidi alimentari testati e le loro caratteristiche fisiche**

	<b>polpa</b>	<b>brix</b>	<b>denistà</b>	<b>viscosità</b>	
	<b>%</b>	<b>%</b>	<b>kg/dm<sup>3</sup></b>	<b>Pa s</b>	<b>cP</b>
<b>Acqua</b>	0,0	0,0	1,0000	0,001	1,0
<b>Arancia Rossa</b>	0,0	7,9	1,0427	0,001	1,0
<b>Arancia e Mandarino</b>	8,0	7,8	1,0060	0,0010	1,0
<b>Mango 1</b>	19,0	11,5	1,0400	0,0073	7,3
<b>Mango 2</b>	19,5	15,7	1,0540	0,0067	6,7
<b>Multifruit</b>	25,0	11,0	1,0240	0,0069	6,9
<b>Banana</b>	25,0	13,9	1,0460	0,0148	14,8
<b>Papaya</b>	25,0	12,0	1,0420	0,0080	8,0
<b>Nettare di Pesca</b>	30,0	8,0	1,0240	0,0106	10,6
<b>Albicocca</b>	40,0	15,5	1,0523	0,0278	27,8
<b>Pera</b>	50,0	14,5	1,0430	0,0404	40,4
<b>Pesca</b>	50,0	14,6	1,0457	0,0187	18,7

I dati relativi al comportamento dei vari fluidi sono stati elaborati in maniera leggermente diversa rispetto a quelli relativi a prodotto birra. Date le quattro zone di abbattimento termico sono stati calcolati i relativi valori di  $DT_t$ . Poiché il valore in sé non ci dà una informazione completa, è stato calcolato il rapporto tra il valore di  $DT_t$  del fluido e il valore del  $DT_t$  dell'acqua, ovvero del fluido dal comportamento noto. In questo modo i valori saranno compresi in una scala che va da 0 a 1. Più il valore sarà vicino all'unità e più simile all'acqua sarà il comportamento del fluido.

#### **5.4.1 Fluidi alimentari nelle bottiglie di PET da 500ml**

In queste prove i vari fluidi sono stati analizzati non i formati da 500ml rappresentati nella Figura 5.8.



**Figura 5.8** Campioni di fluidi alimentari e corrispettivo di acqua nel formato PET 500 ml a) appena inseriti nella camera di prova e b) durante una fase del test di abbattimento multiplo

Gli esiti dei test dei vari fluidi alimentari sono presentati nella Tabella 5.2. Sono stati riportati i valori dei rapporti tra il valore della  $DT_i$  dei fluidi alimentari e il valore della  $DT_i$  dell'acqua per il formato di bottiglia in PET del volume di 500ml. Sono stati riportati in sequenze i valori del rapporto per le quattro fasi di abbattimento termico consecutive riprodotte nella camera di prova del banco prova.

Da una prima analisi si può valutare come alcuni fluidi, come le spremute, hanno un comportamento molto vicino a quello dell'acqua, presentando un valore del rapporto molto vicino all'unità. Inoltre, per le altre fasi di raffreddamento consecutive, i valori in assoluto sono anche costanti, come per il fluido di riferimento. A mano a mano che la percentuale di polpa aumenta si può notare un netto calo del valore del rapporto della  $DT_i$ . I valori non rimangono neanche più costanti ma, per i fluidi con le percentuali più elevate di polpa, il rapporto è quasi nullo per le prime fasi di abbattimento e aumenta con il passare del tempo.

**Tabella 5.2 Rapporti tra i valori della  $DT_t$  dei vari fluidi alimentari e quello dell'acqua al centro geometrico per il formato PET da 500ml per i quattro abbattimenti consecutivi**

	Dati relativi al Centro Geometrico del formato 500 ml			
	(DTf/DTa) zona 1	(DTf/DTa) zona 2	(DTf/DTa) zona 3	(DTf/DTa) zona 4
<b>Acqua</b>	1,000	1,000	1,000	1,000
<b>Arancia Rossa</b>	1,000	1,000	0,964	0,911
<b>Arancia e Mandarino</b>	0,830	0,860	0,858	0,889
<b>Mango 1</b>	0,510	0,417	0,328	0,327
<b>Mango 2</b>	0,226	0,586	0,313	0,322
<b>Multifruit</b>	0,176	0,313	0,217	0,213
<b>Banana</b>	0,347	0,388	0,298	0,366
<b>Papaya</b>	0,329	0,427	0,338	0,316
<b>Nettare di Pesca</b>	0,041	0,124	0,151	0,180
<b>Albicocca</b>	0,050	0,129	0,162	0,186
<b>Pera</b>	0,077	0,144	0,162	0,186
<b>Pesca</b>	0,072	0,139	0,162	0,191

#### **5.4.2 Fluidi alimentari nelle bottiglie di PET da 750ml**

In queste prove i vari fluidi sono stati analizzati non i formati da 750ml rappresentati nella Figura 5.9.

Gli esiti dei test dei vari fluidi alimentari sono presentati nella Tabella 5.3. Sono stati riportati i valori dei rapporti tra il valore della  $DT_t$  dei fluidi alimentari e il valore della  $DT_t$  dell'acqua per il formato di bottiglia in PET del volume di 750ml. Sono stati riportati in sequenze i valori del rapporto per le quattro fasi di abbattimento termico consecutive riprodotte nella camera di prova del banco prova.

Anche per questo formato si può valutare come alcuni fluidi, come le spremute, hanno un comportamento molto vicino a quello dell'acqua, presentando un valore del rapporto molto vicino all'unità. Inoltre, per le altre fasi di raffreddamento consecutive, i valori in assoluto sono anche costanti, come per il fluido di riferimento. A mano a mano che la percentuale di polpa aumenta si può notare un netto calo del valore del rapporto della  $DT_t$ . I valori non rimangono costanti ma, per i fluidi con le percentuali più elevate di polpa, il rapporto è quasi nullo per le prime fasi di abbattimento e aumenta con il passare del tempo



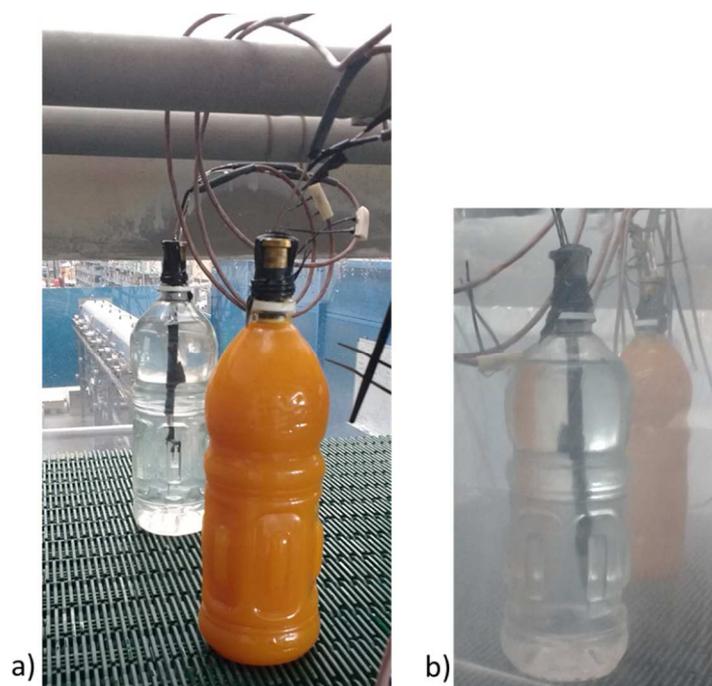
**Figura 5.9** Campioni di fluidi alimentari e corrispettivo di acqua nel formato PET 750 ml a) appena inseriti nella camera di prova e b) durante una fase del test di abbattimento multiplo

**Tabella 5.3** Rapporti tra i valori della  $DT_f$  dei vari fluidi alimentari e quello dell'acqua al centro geometrico per il formato PET da 750ml per i quattro abbattimenti consecutivi

	Dati relativi al Centro Geometrico del formato 750 ml			
	(DT <sub>f</sub> /DT <sub>a</sub> ) zona 1	(DT <sub>f</sub> /DT <sub>a</sub> ) zona 2	(DT <sub>f</sub> /DT <sub>a</sub> ) zona 3	(DT <sub>f</sub> /DT <sub>a</sub> ) zona 4
<b>Acqua</b>	1,000	1,000	1,000	1,000
<b>Arancia Rossa</b>	0,957	0,984	0,986	0,939
<b>Arancia e Mandarino</b>	0,890	0,897	0,900	0,902
<b>Mango 1</b>	0,570	0,560	0,553	0,454
<b>Mango 2</b>	0,360	0,547	0,495	0,542
<b>Multifruit</b>	0,127	0,455	0,353	0,386
<b>Banana</b>	0,316	0,469	0,353	0,339
<b>Papaya</b>	0,487	0,501	0,472	0,595
<b>Nettare di Pesca</b>	0,004	0,068	0,095	0,120
<b>Albicocca</b>	0,012	0,064	0,100	0,125
<b>Pera</b>	0,036	0,100	0,100	0,120
<b>Pesca</b>	0,000	0,073	0,224	0,344

### **5.4.3 Fluidi alimentari nelle bottiglie di PET da 1200ml**

In queste prove i vari fluidi sono stati analizzati non i formati da 1200ml rappresentati nella Figura 5.10.



**Figura 5.10 Campioni di fluidi alimentari e corrispettivo di acqua nel formato PET 1200 ml a) appena inseriti nella camera di prova e b) durante una fase del test di abbattimento multiplo**

Gli esiti dei test dei vari fluidi alimentari sono presentati nella Tabella 5.4. Sono stati riportati i valori dei rapporti tra il valore della  $DT_i$  dei fluidi alimentari e il valore della  $DT_i$  dell'acqua per il formato di bottiglia in PET del volume di 1200ml. Sono stati riportati in sequenze i valori del rapporto per le quattro fasi di abbattimento termico consecutive riprodotte nella camera di prova del banco prova.

Anche per questo formato si può valutare come alcuni fluidi come le spremute hanno un comportamento molto vicino a quello dell'acqua, presentando un valore del rapporto molto vicino all'unità anche se tra una e l'altra i valori sono leggermente differenti. Inoltre, per le altre fasi consecutive i valori in assoluto sono anche costanti, come per il fluido di riferimento. A mano a mano che la percentuale di polpa aumenta si può notare un netto calo del valore del rapporto della  $DT_i$ . I valori non rimangono costanti ma, per i fluidi con le

percentuali più elevate di polpa, il rapporto è quasi nullo per le prime fasi di abbattimento e aumenta con il passare del tempo

**Tabella 5.4 Rapporti tra i valori della  $DT_t$  dei vari fluidi alimentari e quello dell'acqua al centro geometrico per il formato PET da 1200ml per i quattro abbattimenti consecutivi**

	Dati relativi al Centro Geometrico del formato 1200 ml			
	(DTf/D <sub>Ta</sub> ) zona 1	(DTf/D <sub>Ta</sub> ) zona 2	(DTf/D <sub>Ta</sub> ) zona 3	(DTf/D <sub>Ta</sub> ) zona 4
<b>Acqua</b>	1,000	1,000	1,000	1,000
<b>Arancia Rossa</b>	0,964	0,991	0,975	0,964
<b>Arancia e Mandarino</b>	0,764	0,869	0,872	0,902
<b>Mango 1</b>	0,487	0,493	0,465	0,466
<b>Mango 2</b>	0,506	0,443	0,419	0,435
<b>Multifruit</b>	0,273	0,388	0,396	0,404
<b>Banana</b>	0,268	0,376	0,327	0,348
<b>Papaya</b>	0,399	0,559	0,407	0,479
<b>Nettare di Pesca</b>	0,000	0,144	0,419	0,404
<b>Albicocca</b>	0,000	0,006	0,052	0,075
<b>Pera</b>	0,000	0,050	0,069	0,081
<b>Pesca</b>	0,000	0,199	0,241	0,255

#### **5.4.4 Fluidi alimentari nelle bottiglie di PET da 1500ml**

In queste prove i vari fluidi sono stati analizzati non i formati da 1500ml rappresentati nella Figura 5.11

Gli esiti dei test dei vari fluidi alimentari sono presentati nella Tabella 5.5. Sono stati riportati i valori dei rapporti tra il valore della  $DT_t$  dei fluidi alimentari e il valore della  $DT_t$  dell'acqua per il formato di bottiglia in PET del volume di 1500ml. Sono stati riportati in sequenze i valori del rapporto per le quattro fasi di abbattimento termico consecutive riprodotte nella camera di prova del banco prova.

Anche per questo formato si può valutare come alcuni fluidi come le spremute hanno un comportamento molto vicino a quello dell'acqua, presentando un valore del rapporto molto vicino all'unità anche se tra una e l'altra i valori sono leggermente differenti. Inoltre, per le altre fasi consecutive i valori in assoluto sono anche costanti, come per il fluido di riferimento. A mano a mano che la percentuale di polpa aumenta si può notare un netto calo del valore del rapporto della  $DT_t$ . I valori non rimangono costanti ma, per i fluidi con le

percentuali più elevate di polpa, il rapporto è quasi nullo per le prime fasi di abbattimento e aumenta di poco con il passare del tempo



Figura 5.11 Campioni di fluidi alimentari e corrispettivo di acqua nel formato PET 1500 ml a) appena inseriti nella camera di prova e b) durante una fase del test di abbattimento multiplo

Tabella 5.5 Rapporti tra i valori della  $DT_t$  dei vari fluidi alimentari e quello dell'acqua al centro geometrico per il formato PET da 1500ml per i quattro abbattimenti consecutivi

	Dati relativi al Centro Geometrico del formato 1500 ml			
	(DTf/DTa) zona 1	(DTf/DTa) zona 2	(DTf/DTa) zona 3	(DTf/DTa) zona 4
<b>Acqua</b>	1,000	1,000	1,000	1,000
<b>Arancia Rossa</b>	1,000	1,000	1,000	1,000
<b>Arancia e Mandarino</b>	0,907	0,913	0,905	0,956
<b>Mango 1</b>	0,654	0,626	0,597	0,693
<b>Mango 2</b>	0,583	0,600	0,476	0,547
<b>Multifruit</b>	0,395	0,509	0,476	0,460
<b>Banana</b>	0,389	0,489	0,362	0,387
<b>Papaya</b>	0,453	0,476	0,463	0,525
<b>Nettare di Pesca</b>	0,000	0,020	0,054	0,255
<b>Albicocca</b>	0,000	0,007	0,201	0,467
<b>Pera</b>	0,000	0,007	0,040	0,066
<b>Pesca</b>	0,000	0,176	0,449	0,357

## 5.5 Conclusioni ed Osservazioni

Prendendo a riferimento la storia termica dei vari campioni registrata al centro geometrico di tre tipologie di fluidi diverse (arancia rossa, mango e pera) si mettono in evidenza tre comportamenti diversi di scambio di calore. Con le quattro fasi di abbattimento termico il fluido può scambiare calore al proprio interno con tre processi differenti:

- arancia rossa: il comportamento di questo tipo di fluido è lo stesso del fluido di riferimento ovvero l'acqua, lo scambio di calore interno avviene per convezione naturale che genera delle celle convettive, come si può vedere nella Figura 5.12. **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** dove è stata riportata l'evoluzione termica all'interno dei campioni nei tre punti monitorati durante il trattamento termico composto da quattro abbattimenti di temperatura consecutivi; i tre valori registrati, alla fine del trattamento termico, si trovano in un intervallo di temperature dell'ordine di cinque gradi per entrambe i campioni analizzati;

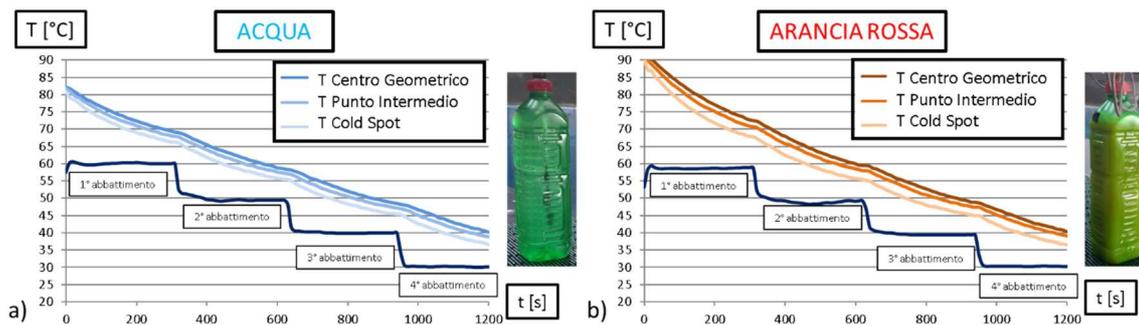
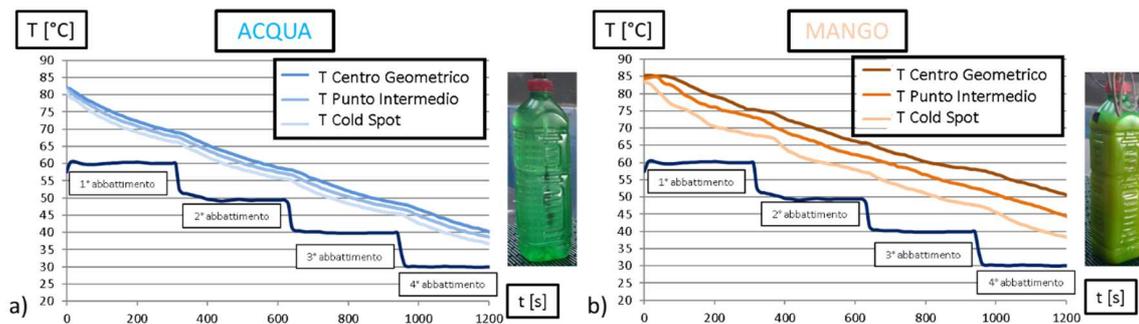


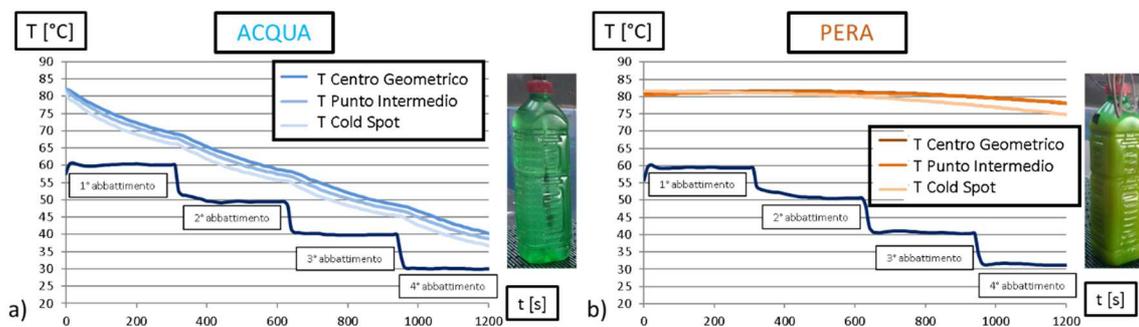
Figura 5.12 Evoluzione termica attraverso i quattro abbattimenti di temperatura consecutivi a) del campione da 1500ml contenente acqua e b) del campione da 1500ml contenente arancia rossa

- mango: il comportamento di questo tipo di fluido è simile al fluido di riferimento ma presenta un leggero scostamento temporale; lo scambio di calore interno avviene per convezione naturale che genera delle celle convettive ma, come si può vedere nella Figura 5.13, nella fase iniziale lo scambio di calore è ritardato; questo mette in evidenza un fenomeno conduttivo iniziale che rallenta l'innesco delle celle convettive; inoltre, considerando le temperature registrate nei tre punti lungo l'asse, si può notare una notevole differenza di valore tra i diversi punti dato che sono distanti più di dieci gradi;



**Figura 5.13** Evoluzione termica attraverso i quattro abbattimenti di temperatura consecutivi a) del campione da 1500ml contenente acqua e b) del campione da 1500ml contenete mango

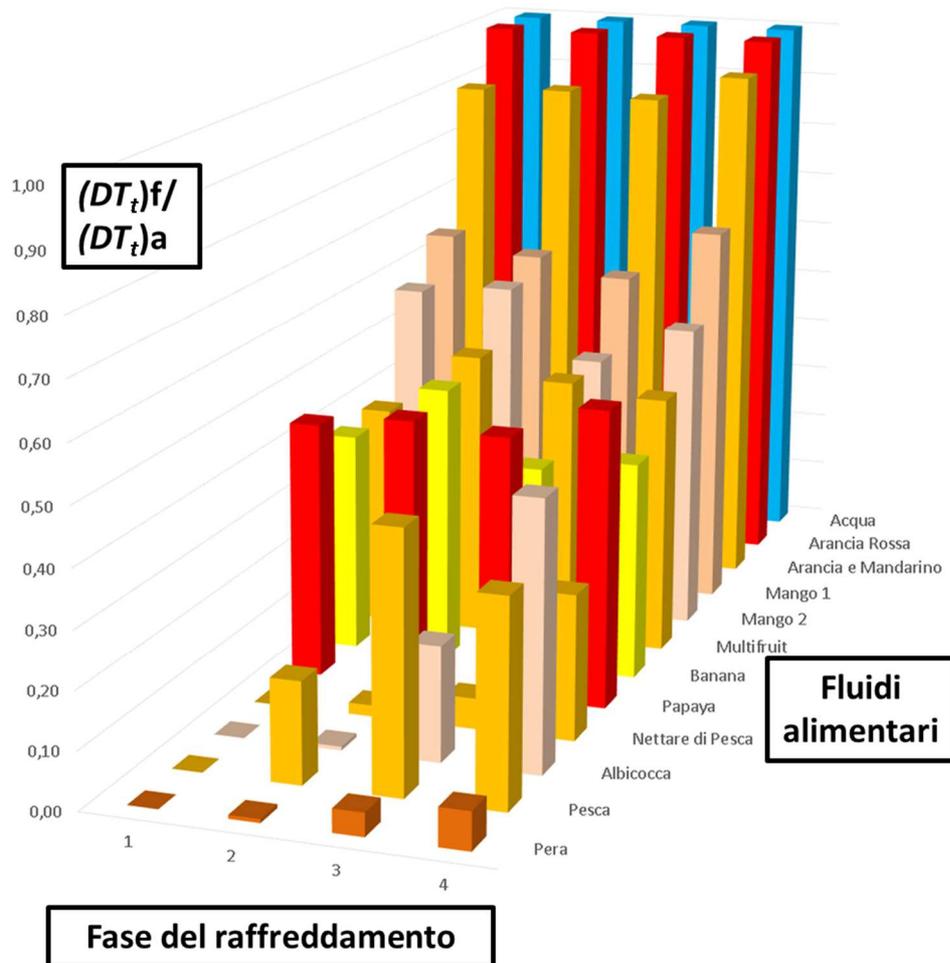
➤ pera: il comportamento di questo tipo di fluido è completamente diverso dal comportamento del fluido di riferimento; lo scambio di calore interno in questo caso avviene per conduzione e, nel tempo di durata del test, non fanno in tempo a generarsi celle convettive; dalla Figura 5.14 si può notare anche come i valori lungo l'asse di assialsimmetria, alla fine di un trattamento termico dalla durata di venti minuti, siano simili ma ancora ad una temperatura molto elevata e distante più di quaranta gradi rispetto a quella che viene indotta nella camera di prova con l'erogazione delle docce



**Figura 5.14** Evoluzione termica attraverso i quattro abbattimenti di temperatura consecutivi a) del campione da 1500ml contenente acqua e b) del campione da 1500ml contenete pera

Le immagini riportano l'evoluzione termica attraverso i quattro abbattimenti di temperatura consecutivi per campioni di acqua e succhi di frutta per formati in PET dal volume di 1500 ml. La scelta di mettere in evidenza questi risultati è legata al fatto che il formato maggiore testato mette in maggiore risalto il problema legato alla conduzione per quei fluidi con le caratteristiche più lontane dal fluido di riferimento.

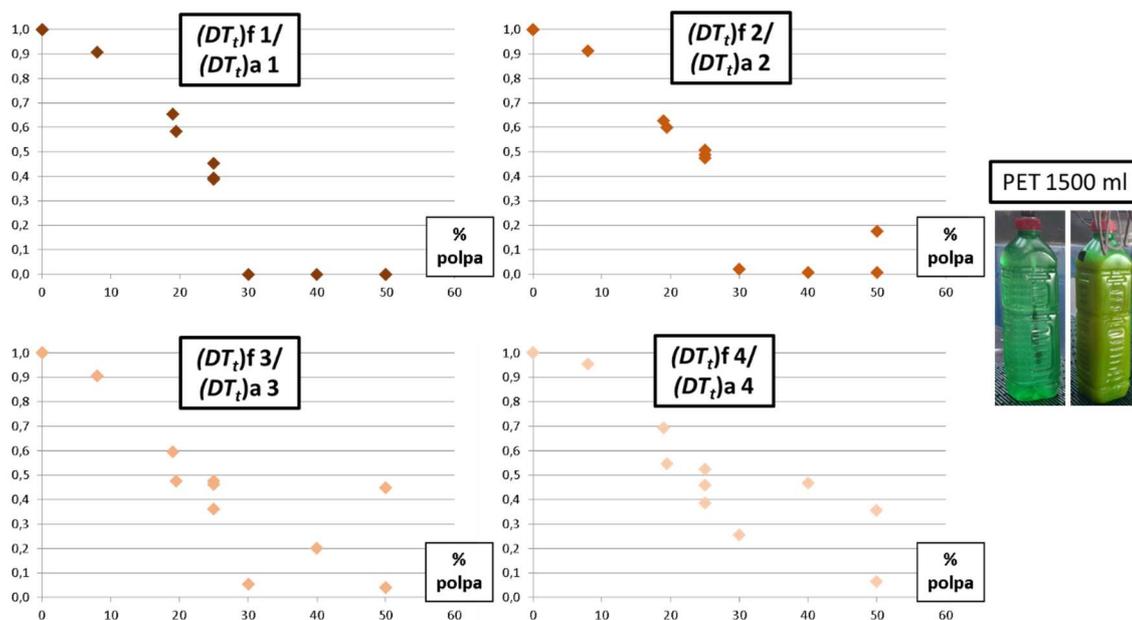
Mettendo assieme tutti i valori del rapporto tra il valore della  $DT_t$  dei fluidi alimentari e il valore della  $DT_t$  dell'acqua per il formato di bottiglia in PET del volume di 1500 ml con i valori della temperatura misurati al centro geometrico per i quattro abbattimenti consecutivi si può ricavare un istogramma come quello riportato nella Figura 5.15. Risulta evidente che passando da acqua a fluidi con le caratteristiche che descrivono i succhi di frutta a base di polpa di pera o pesca il comportamento cambia radicalmente. I tempi necessari per un abbattimento della temperatura al centro geometrico della bottiglia misurata in questo modo fino al valore voluto con macchine a tunnel sarebbero decisamente troppo elevato.



**Figura 5.15** Istogramma che riporta e mette a confronto il rapporto tra i valori della  $DT_t$  dei vari fluidi alimentari e quello dell'acqua al centro geometrico per il formato PET da 1500ml per i quattro abbattimenti consecutivi

Cercando di trovare un legame tra le caratteristiche fisiche dei fluidi e i valori del rapporto tra il valore della  $DT_t$  dei fluidi alimentari e il valore della  $DT_t$  dell'acqua, è stato

messo in relazione il parametro adimensionale precedentemente citato con il valore della percentuale di polpa di frutta, unico dato fornito dal produttore direttamente sul contenitore del prodotto stesso, e quindi sempre noto. Come si può vedere dai grafici di Figura 5.16 relativi al formato di 1500 ml di volume, se si presta attenzione alla prima zona di abbattimento, si può notare una correlazione abbastanza diretta tra il parametro fisico e il rapporto sperimentale da noi calcolato.



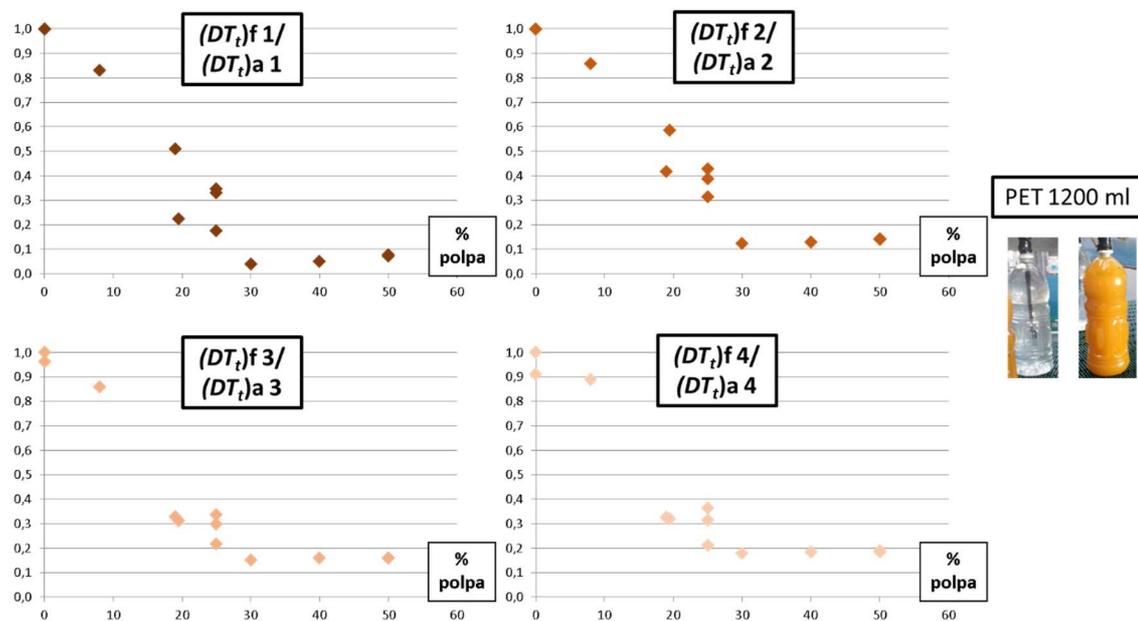
**Figura 5.16** Relazione tra la percentuale di polpa dei vari succhi e il rapporto tra i valori della  $DT_t$  dei vari fluidi alimentari e quello dell'acqua al centro geometrico per il formato PET da 1500ml per i quattro abbattimenti consecutivi

La stessa analisi può essere fatta anche per gli altri formati e i dati sono riportati nelle immagini di Figura 5.17, di Figura 5.18 e di Figura 5.19 e si possono trarre le stesse conclusioni. Come si può vedere analizzando i valori relativi alle prime zone di abbattimento, nella zona in cui vengono a finire i succhi con percentuale di polpa inferiore al 10% i valori del rapporto tra il valore della  $DT_t$  dei fluidi alimentari e il valore della  $DT_t$  dell'acqua sono praticamente unitari. Se la percentuale di polpa del frutto è maggiore al 20% i valori del rapporto sono inferiori allo 0.5, ovvero il comportamento dei due fluidi si allontana parecchio. Nella zona compresa tra il 10 e il 20 quindi viene a verificarsi il cambio di processo con cui viene a verificarsi lo scambio di calore. Ciò implica, tra le altre cose, la

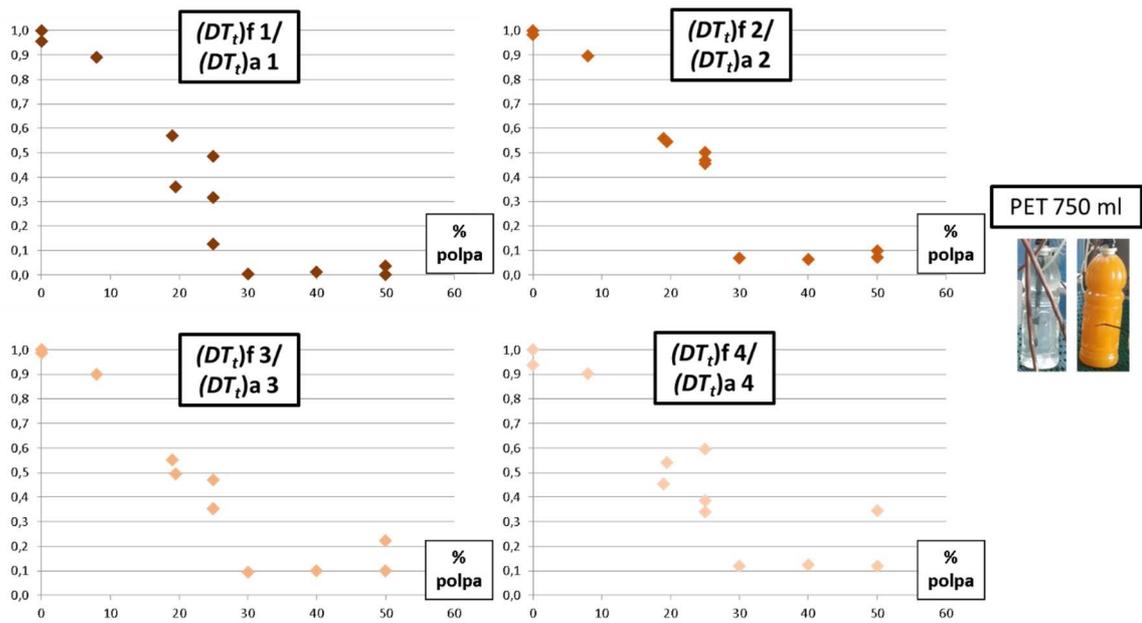
necessità di dimensionare le macchine per l'abbattimento termico a tunnel in un'altra maniera, o allungando i tempi o cambiando il modo di abbattere la temperatura.

Per questa analisi sono stati usati anche gli altri parametri fisici che caratterizzano i vari fluidi alimentari e che sono stati indicati in precedenza ma non evidenziano in maniera così esplicita un trend di comportamento netto come quello messo in mostra dal parametro percentuale di polpa. La viscosità dinamica mette in evidenza lo stesso comportamento ma è un parametro che va scelto e misurato solo in certe condizioni a volte lontane da quelle di lavoro delle macchine prese in considerazione.

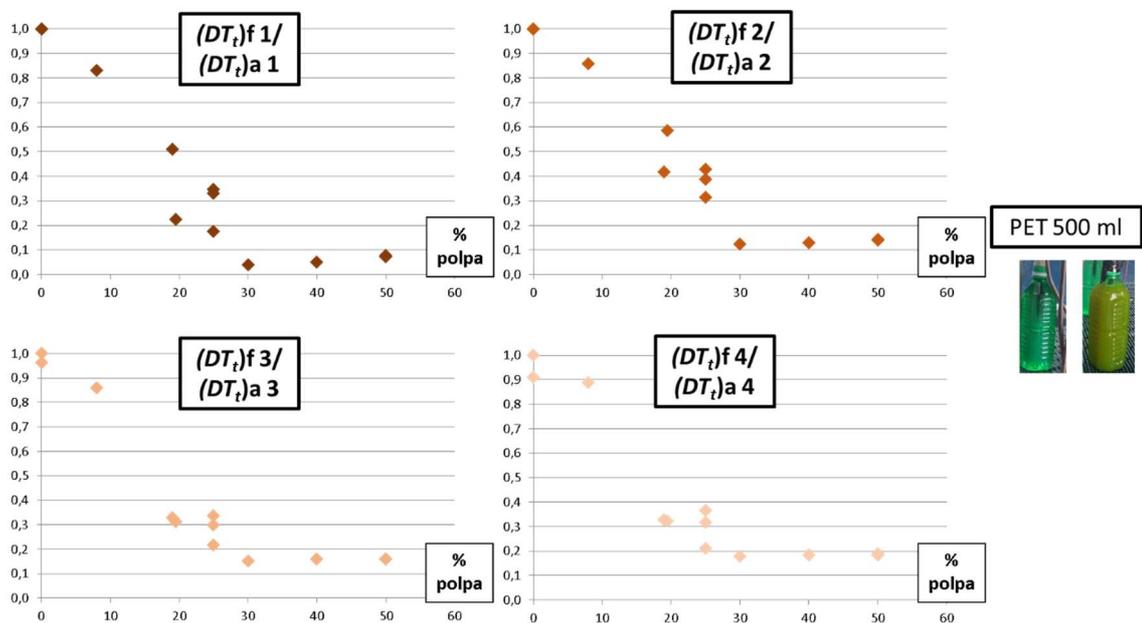
La raccolta di tutti questi dati ha quindi permesso la stesura di un primo database di informazioni che permetterà all'azienda di prendere decisioni in fase di progetto di macchine per il trattamento termico di fluidi alimentari dalle caratteristiche fisiche diverse. La campagna di test sperimentali è stata ampia ma probabilmente ancora molto lavoro c'è da fare per ricavare linee guida sicure e che garantiscono con certezza il trattamento sicuro dei prodotti.



**Figura 5.17** Relazione tra la percentuale di polpa dei vari succhi e il rapporto tra i valori della  $DT_t$  dei vari fluidi alimentari e quello dell'acqua al centro geometrico per il formato PET da 1200ml per i quattro abbattimenti consecutivi



**Figura 5.18** Relazione tra la percentuale di polpa dei vari succhi e il rapporto tra i valori della  $DT_t$  dei vari fluidi alimentari e quello dell'acqua al centro geometrico per il formato PET da 750ml per i quattro abbattimenti consecutivi



**Figura 5.19** Relazione tra la percentuale di polpa dei vari succhi e il rapporto tra i valori della  $DT_t$  dei vari fluidi alimentari e quello dell'acqua al centro geometrico per il formato PET da 500ml per i quattro abbattimenti consecutivi

# Conclusioni

## **6.1 Riepilogo**

L'obiettivo di questa tesi era quello di aumentare la conoscenza dei fenomeni che si verificano durante i cicli di trattamento termico all'interno delle macchine a tunnel per lavorazioni industriali di prodotti alimentari.

La prima fase del progetto ha richiesto una ricerca estesa delle tecnologie coinvolte nelle applicazioni industriali del trattamento termico per le sostanze alimentari. Dopo aver aumentato la conoscenza in questo tipo di ambito, è stato definito un approccio da poter seguire nell'arco di tempo a disposizione per poter raggiungere gli obiettivi prefissati.

Per raggiungere l'obiettivo, quindi, sono stati intrapresi in parallelo due approcci: quello numerico e quello sperimentale.

L'approccio numerico ha portato allo sviluppo in ambiente Matlab di un modello ben descritto in letteratura e ha dato lo spunto per portar avanti una campagna di simulazione numerica con software dedicati alle CFD.

L'approccio sperimentale, invece, ha richiesto un percorso più complicato dato che è stato necessario progettare e costruire l'ambiente adeguato nel quale condurre le varie campagne di sperimentazione. Dopo la fase di progettazione e realizzazione del banco prova sono stati analizzati i diversi comportamenti dei fluidi alimentari come la birra, che subisce un ciclo completo di pastorizzazione, e i succhi di frutta che subiscono invece solo la fase finale di raffreddamento.

## **6.2 Risultati ottenuti**

Dato che l'obiettivo della tesi è quello di aumentare la conoscenza dei fenomeni che si verificano durante i cicli di trattamento termico all'interno delle macchine a tunnel per lavorazioni industriali di prodotti alimentari sono stati scelti due approcci diversi per ottenere i risultati previsti: un approccio numerico e uno sperimentale.

Il primo approccio ha riguardato la modellazione numerica del problema. La ricerca di letteratura ha permesso di arrivare ad avere ben definito il problema legato allo scambio termico che viene a verificarsi all'interno della camera durante la fase di trattamento termico del prodotto. Il problema principale, ovvero quello di definire un profilo di temperatura all'interno del prodotto durante il trattamento termico, risulta essere molto legato alla definizione del coefficiente di scambio termico globale determinato da i fenomeni di convezione forzata tra la pioggia erogata in camera e l'esterno del contenitore del prodotto, dalla conduzione attraverso le pareti del contenitore e la convezione naturale-conduzione interna al fluido sottoposto a trattamento termico. Con l'approccio numerico sono stati ottenuti quindi dei modelli utilizzabili in fase di progettazione che permettono di prevedere il comportamento dei fluidi facendo variare le condizioni al contorno. Con l'approccio dei volumi finiti è stato ricreato, tramite uno script in ambiente di calcolo di Matlab, il processo di convezione naturale per il prodotto di tipo birra assumendo che le caratteristiche fisiche fossero molto simili all'acqua e che potessero variare in funzione della temperatura con le equazioni caratteristiche dell'acqua stessa. Con la CFD sono stati verificati gli stessi modelli ma sono stati esplorati i campi dei fluidi alimentari assumendo ipotesi che permettessero di ottenere risultati attendibili e che dessero indicazioni per una modellazione via via sempre migliore. Sono stati ottenuti quindi degli strumenti molto utili in fase di progettazione delle macchine a tunnel per il trattamento termico di pastorizzazione e di raffreddamento per prodotti convenzionali come la birra ma anche per prodotti alimentari di diverso ambito.

Il secondo approccio ha riguardato la parte sperimentale del problema. Dato che l'azienda con cui è stata portata avanti la collaborazione dispone di tante informazioni, derivanti da anni di lavoro nell'ambito delle macchine a tunnel, è risultato molto efficace sfruttare la conoscenza dei tecnici di linea e di produzione per verificare, in laboratorio, le possibili condizioni sfavorevoli che le applicazioni industriale possono presentare. Si è quindi progettato da zero e costruito in laboratorio un banco prova che permettesse riprodurre il processo termico in modo tale da rendere possibile lo studio diretto dei prodotti ed eseguire le modifiche possibili a rendere efficiente lo scambio termico in tutte le

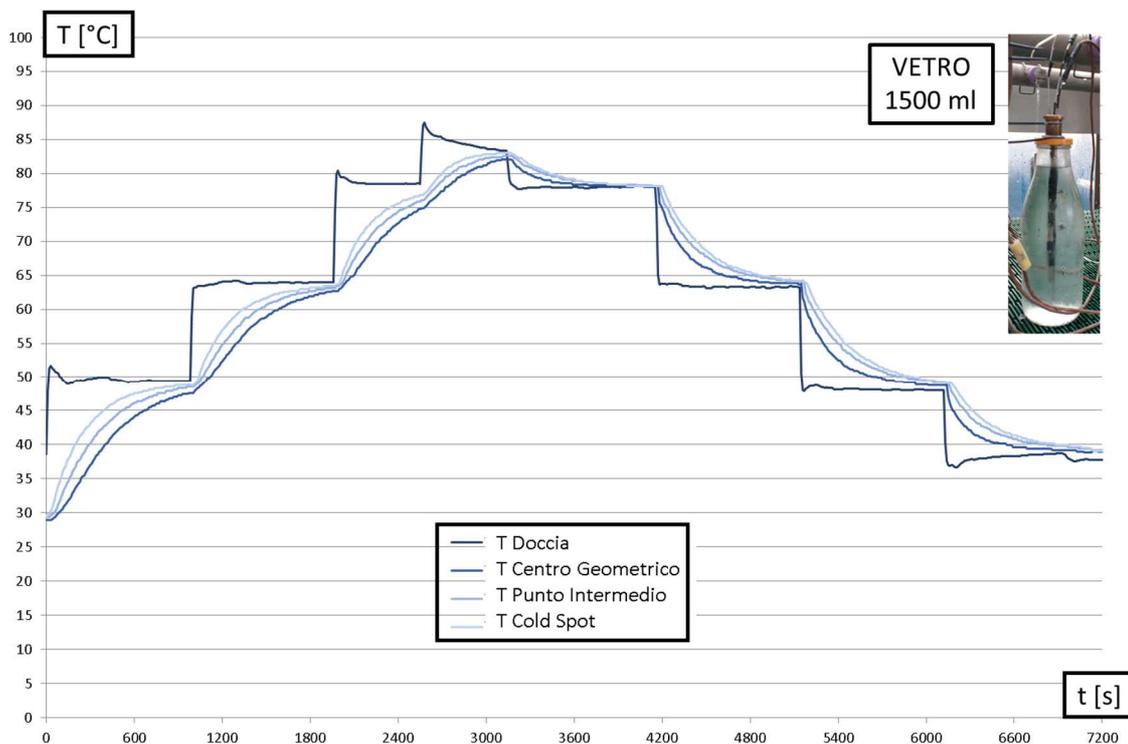
condizioni industrialmente possibili. A partire dalla portata specifica di acqua erogata in camera di prova, passando per la scelta del pattern (combinazione di passo tubi e ugelli di erogazione) e per la miglior tecnologia di spruzzatura tramite ugelli diversi si è reso il processo il più energeticamente efficiente possibile. Un grande lavoro è stato fatto per uno dei prodotti di punta, e storicamente molto lavorato, come la birra ma anche gli altri fluidi alimentari sono stati oggetto di una vasta campagna di studi. Sono stati presi in considerazione più di 15 fluidi alimentari diversi in modo da poter esplorare quello che per molti è un settore importate per lo sviluppo aziendale e per la ricerca scientifica. Sempre più, infatti, si cerca di raccogliere in linee guida generalizzate quelle che spesso sono state scelte empiriche o leggi dettate dalla tradizione interne all'azienda in fase di progettazione. La raccolta dei dati ha quindi permesso la compilazione di un primo database di informazioni che permetterà all'azienda di prendere decisioni importanti in fase di progetto di macchine per il trattamento termico di fluidi alimentari dalle caratteristiche fisiche diverse. La campagna di test sperimentali è stata ampia ma, probabilmente, ancora molto lavoro c'è da fare per ricavare linee guida sempre più sicure e che garantiscono con certezza il trattamento sicuro dei prodotti.

### **6.3 Sviluppi futuri**

A partire dai risultati ottenuti, con l'approccio numerico si può pensare di sviluppare un modello ad hoc per ogni fluido alimentare di interesse aziendale e scientifico, implementando correttamente tutte le caratteristiche fisiche con la loro dipendenza dalla temperatura sempre in evoluzione durante i processi di trattamento termico. L'approccio numerico risulta essere molto apprezzato sia in ambito accademico che in ambito aziendale anche se, per limiti di conoscenza, è un settore non molto esplorato dagli uffici tecnici per via della conoscenza specifica richiesta nell'utilizzo di software di CFD. La collaborazione tra Università e Azienda, da questo punto di vista, ha permesso lo sviluppo di un metodo virtuoso di ricerca scientifica e sviluppo. Infatti, tenendo sempre ben presente che la ricerca scientifica e lo sviluppo di modelli deve avere come risvolto finale il rendere le macchine meno costose e più efficienti, c'è stato il modo di coinvolgere in maniera attiva tutti i tecnici specializzati nei vari settori in modo da costruire modelli numerici il più possibili vicini alla realtà.

Dopo la grande campagna sperimentale condotta, è stato inoltre possibile affermare che l'investimento fatto nella realizzazione del banco prova aziendale è stato positivo e utile a prevedere possibili problematiche riscontrabili nelle applicazioni industriali delle

macchine a tunnel. In questa ottica è stato possibile anche verificare un completo ciclo termico di pastorizzazione con un prodotto preso a riferimento. Nella Figura 6.1 è stata riportata l'evoluzione termica attraverso tutte le fasi di un intero ciclo di pastorizzazione per un campione di acqua in un contenitore di vetro dal volume di 1000 ml per i classici tre punti monitorati anche nelle prove precedenti, ovvero Cold Spot, Centro Geometrico e Punto Intermedio.



**Figura 6.1** Evoluzione termica attraverso tutte le fasi di un intero ciclo di pastorizzazione di un campione in vetro del volume da 1000ml contenente acqua

Il test evidenzia alcune lacune del banco prova su cui si può lavorare per poter migliorare i risultati dei test infatti, soprattutto alle alte temperature, risulta difficile mantenere costate la temperatura stessa delle piogge. Una possibile soluzione è legata alla diminuzione delle perdite e alle dissipazioni di calore della camera di prove e del circuito che eroga l'acqua in camera di prova. Coibentando i tubi e isolando alcune pareti fisse della camera di prova sarà possibile rendere lo scambio di calore non voluto della camera di prova con l'ambiente esterno del laboratorio meno influente sui risultati delle prove sperimentali.

La scelta di prodotti con caratteristiche fisiche diverse e l'utilizzo di differenti materiali per i contenitori può inoltre permettere l'esecuzione di una campagna sperimentale aggiuntiva. Questa darà la possibilità di conoscere meglio il comportamento dei fluidi alimentari definendo delle linee guida condivise per la progettazione e per la realizzazione di macchina a tunnel per la il trattamento termico dei prodotti stessi.



# Bibliografia

- Bejan, A. (1984). *Convection Heat Transfer*. New York: Wiley Sons.
- Bird, R., Stewart, W., & Lightfoot, E. (1960). *Transport Phenomena*. John Wiley Sons.
- Cammalleri, A. L. (2016). Study on heat transfer coefficients during cooling of PET bottles for food beverages. *Heat Mass Transfer*, 1479-1488.
- Clyne, C., Wooler, G., Teng, J., & Naji, H. (1989).
- Crank, J., & Nicolson, J. (1947). A practical method for numerical evaluation of solutions of partial differential equations of the heat conduction type. *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, 43, 50-67.
- Del Vecchio, H., Dayharsh, C., & Baselt, F. (1951). Thermal death time studies on beer spoilage organisms. *Annual Meeting*, 9, p. 45-50. American Society of Brewing Chemists.
- Deng, S., Ruan, R., Mok, C., Huang, G., Lin, X., & Chen, P. (2007). Inactivation of *Escherichia Coli* on Almonds Using Nonthermal Plasma. *Journal of Food Science*, 72.
- Derossi, A., De Pilli, T., La Penna, M., & Sevrini, C. (2012). Prediction of heating length to obtain a definite F Value during pasteurization of canned food. *Journal of Food Process Engineering*.
- FAO. (s.d.). Tratto da <http://www.fao.org/statistics/en/>

- Guerreri, G., & Rase, H. (2002). *Progettazione di impianti industriali chimici e alimentari*. Maggioli Editore.
- Hammer, P., & Mayer, M. (2004). Model Predictive Control of the Distribution Parameter Sysyte Tunnel Pasteurizer.
- Hoffmann Larsen, K. (2006). *Beer pasterization models*. Kongens Lyngby.
- Khalili, F., Shokri, B., Khani, M., Hasani, M., Zandi, F., & Aliahmadi, A. (2018). A Study of the effect of glinding arc non thermal plasma on almomds decontamination. *AIP Advances*, 8.
- Lewicki, P. (1985). Heat Transfer in a Tunnel Pasteuriser. Part III. Application of the Shultz-Olson Theory. *Juornal of Food Engineering*, 265 289.
- Liga, A., Montesanto, S., Mannella, G., La Carruba, V., Brucato, V., & Cammalleri, M. (2016). Study on heat transfer coefficient during cooling of Pet Bottles for food Beverages. *Heat mass Transfer*.
- Lighthill, J. (1965). *Waves in Fluids*. Cambridge Mathematical Library.
- Mc Adams, W. (1954). *Heat Transmission*. McGraw Hill .
- Patterson, J., & Imberger, j. (1980). Unsteady natural convection in a rectangular cavity. *Juornal of fluid machanics*, 100, 65-86.
- Sargolazei, J., Mosavian, M., & Hassani, A. (2011). Modelling and Simulation of High Power Ultrasonic Process in Preparation of Stalbel Oil in Water Emulsion. *Journal of Software Engenireeng and Applications*, 4, 259-267.
- Singh , R., & Heldman, D. (2001). *Introdution to food Engineering*. San Diego: Academic Press.
- Suslick, K., & Flannigan, D. (2008). Inside a Collapsing Bubble: Sonoluminescence and the conditions During Cavitation. *Annual Review of Phisical Chemististry*, 59, 659-683.
- Zufall, C., & Wackerbauer, K. (2012). The Biologiaicàl Impact of flash Pasteurization over a Wide Temperature Interval. *Juornal of The Institute of Brewing*.