

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE

CORSO DI LAUREA TRIENNALE IN INGEGNERIA CHIMICA E DEI MATERIALI

**Tesi di Laurea Triennale in
Ingegneria Chimica e dei Processi Industriali**

**Reologia del cioccolato: analisi del comportamento di una sospensione
in moto laminare**

Tutor universitario: Prof. Monica Giomo

Laureando: BIASI ALBERTO

ANNO ACCADEMICO 2020-2021

Ai nonni Filiberto, Silvio, Valentina e Maria

Indice

1	Principi di reologia	1
1.1	Sospensione	1
1.2	Classificazione dei fluidi	2
1.3	Fluidi pseudoplastici	2
1.4	Modelli non-newtoniani	3
1.4.1	Legge di potenza	3
1.4.2	Herschel-Bulkley	4
1.5	Numero di Reynolds	4
2	Composizione della miscela	7
2.1	Il cacao	7
2.1.1	Polvere di cacao	9
2.1.2	Burro di cacao	9
2.2	Zucchero e dolcificanti	10
2.3	Latte	11
2.4	Emulsionanti	12
2.5	Composizione del cioccolato	13
2.6	Dosaggio e miscelazione	15
2.6.1	Dosaggio	15
2.6.2	Miscelazione	15
3	Processi	17
3.1	Raffinazione	17
3.2	Concaggio	18
3.3	Tempra o pre-cristallizzazione	19
3.3.1	Il processo di pre-cristallizzazione industriale	21
3.3.2	Tempratrici	23
3.3.3	Movimentazione e stoccaggio	25
3.3.4	Strumentazione per il controllo del grado di tempra	26
4	Modello	31
4.1	Presentazione del problema	31
4.2	Trattazione preliminare	31
4.3	Risoluzione modello matematico	32
4.3.1	Calcolo profilo velocità	33
4.4	Discussione risultati	35

Capitolo 1

Principi di reologia

Per iniziare la trattazione, all'interno di questo primo capitolo, verranno introdotti i principi fondamentali della reologia necessari per poter comprendere le applicazioni successive descritte per l'industria del cioccolato.

In questa breve introduzione verranno riportati in maniera più approfondita solamente i concetti legati direttamente alla futura trattazione, quali la definizione di sospensione, quella di fluido non-newtoniano ed in particolare verrà descritto il comportamento dei fluidi pseudoplastici e definito il numero di Reynolds per modelli non newtoniani.

Nella parte finale del capitolo si introdurranno i differenti modelli sviluppati per lo studio di fluidi pseudoplastici, i quali verranno applicati successivamente nel capitolo 4, per descrivere il moto del fluido all'interno di una condotta termostata.

1.1 Sospensione

Il cioccolato fuso viene definito chimicamente come una sospensione, miscela di particelle insolubili in un fluido, nel caso in esame si ha una dispersione di un solido, fase discontinua, all'interno di un fluido, fase continua.

La fase continua è composta dai grassi: burro di cacao(2.1.2) e grassi del latte(2.3), mentre la fase discontinua è composta dal particolato solido: il cacao in polvere(2.1), il latte in polvere(2.3) e lo zucchero(2.2).

Oltre a questi componenti la sospensione per poter essere mantenuta necessita di emulsionanti, che verranno approfonditi nella sezione 2.4.

La sospensione è quindi una miscela eterogenea, questa differisce dalle altre dispersioni, quali i colloidi per la dimensione del particolato solido, occorre che le particelle al suo interno abbiano dimensioni superiori ai 10^{-6}m . [12]

Le miscele nello stato di sospensioni presentano molte proprietà particolari legate alle interazioni tra le due fasi continua e discontinua, in particolare le sospensioni sono caratterizzate dalle proporzioni tra le fasi e dalle dimensioni delle particelle solide che ne influenzano la viscosità.

1.2 Classificazione dei fluidi

Dopo aver definito la composizione del cioccolato, occorre considerare come la sospensione si comporta durante la lavorazione industriale, questo passaggio assume grande importanza perché dallo studio del comportamento reologico e dalle informazioni ottenute si ricavano, come illustrato nei capitoli successivi, le soluzioni a molti dei problemi industriali.

La reologia per l'utilizzo industriale viene definita solitamente tramite la valutazione di due valori caratteristici, la viscosità e il limite di scorrimento.

La viscosità misura la resistenza allo scorrimento di un fluido sottoposto ad uno sforzo, la risposta più semplice è descritta nella legge di Newton(1.1) che rappresenta, tramite la viscosità, la proporzionalità diretta tra sforzo e gradiente di velocità.[4]

$$\tau = \mu \nabla v \quad (1.1)$$

Nella relazione di Newton la viscosità viene rappresentata con il simbolo μ ed è definita dal rapporto tra lo sforzo applicato sul fluido e il gradiente di velocità risultate, questo rapporto per fluidi newtoniani rimane costante.

Il cioccolato però assieme a molti altri fluidi non presenta questa tipologia di comportamento, infatti al variare dello sforzo applicato si ha una variazione del valore della viscosità.

I fluidi che non seguono la legge di Newton sono detti non newtoniani, e possono essere divisi in diverse categorie che dipendono da come varia la viscosità: se questa cresce all'aumentare dello sforzo si definiscono i fluidi dilatanti, questi solitamente sono caratterizzati da agglomerazioni a livello molecolare che ne aumentano la viscosità con lo sforzo, mentre nei fluidi pseudoplastici in cui la viscosità cala al crescere dello sforzo, le particelle tengono a distendersi o ad allinearsi, il comportamento delle tipologie descritte è riassunto nel grafico 1.1a.[4]

Il limite di scorrimento per un fluido è definito dal minimo sforzo necessario per metterlo in movimento, questo valore è proporzionale all'energia che contiene il reticolo formato dalle forze intramolecolari del fluido considerato, limiti di scorrimento elevati sono indice della formazione di strutture stabili nel fluido in quiete, nel grafico 1.1a il limite di scorrimento è indicato dall'intercetta sull'asse dello sforzo, nelle curve in cui questo punto non coincide con l'origine.[4]

Considerando il cioccolato, questo assume nei range utili industrialmente le caratteristiche tipiche di un fluido non newtoniano pseudoplastico con un limite di scorrimento e questa tipologia di fluidi è detta di Herschel-Bulkley(HB).[6]

Il comportamento del cioccolato risulta interessante anche al di fuori dei range utili industrialmente, infatti se a bassi sforzi questo ha un andamento pseudoplastico, quando questi diventano molto elevati assume un comportamento da fluido dilatante, dovuto agli sforzi eccessivi che fanno rompere e collassare la struttura a livello molecolare, portando le particelle ad agglomerarsi.

1.3 Fluidi pseudoplastici

La tipologia dei fluidi pseudoplastici, anche definiti dall'inglese *shear thinning*, sono caratterizzati da una diminuzione della viscosità apparente all'aumentare dello sforzo appli-

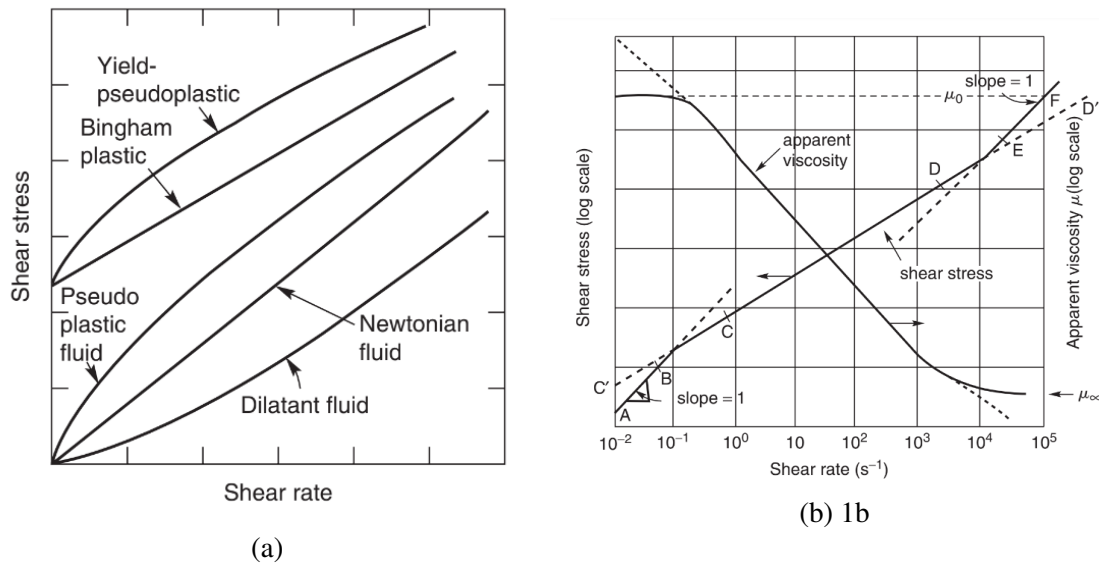


Figura 1.1

cato.

Il grafico 1.1b descrive l'andamento della viscosità per diverse intensità di sforzo: nel caso di un fluido pseudoplastico, per bassi sforzi questo presenta una viscosità pressoché costante, definita come μ_0 , all'aumentare dello sforzo il grafico decresce con la pendenza caratteristica della sostanza, questa proprietà risulta utile per la costruzione di modelli matematici in grado di descrivere il comportamento dei fluidi non newtoniani.

Infine la parte terminale del grafico per alti sforzi presenta un secondo plateau che viene definito di viscosità all'infinito e indicato da μ_∞ . [6]

1.4 Modelli non-newtoniani

Il comportamento dei fluidi pseudoplastici, come anche quello dei dilatanti, non può essere descritto utilizzando il modello di Newton, ma occorre introdurre nuovi modelli in grado di descrivere la variazione della viscosità.

Tra i modelli utilizzabili per definire i fluidi non-newtoniani in questa trattazione verranno presentati il modello della legge di potenza e quello di Herschel-Bulkley, questi due modelli sono stati selezionati perché seppur permettendo di ottenere risultati affidabili, questi non trovano utilità nello studio di una categoria specifica di fluidi ma la trattazione può essere con le opportune ipotesi modificata ed estesa, al fine di valutare il comportamento di altre tipologie di fluidi sia newtoniani che non-newtoniani. [6]

1.4.1 Legge di potenza

Il primo tra i modelli descritti in questa sezione è quello della legge di potenza (PL) o Ostwald-de Waele, questo modello definisce la viscosità del fluido tramite l'equazione 1.2. [4]

$$\mu = K(\dot{\gamma})^{n-1} \quad (1.2)$$

Da questa definizione della viscosità possiamo ricondurci ad un'equazione simile a quella di Newton vista in precedenza.

$$\tau = K(\dot{\gamma})^n \quad (1.3)$$

Nell'equazione 1.3 notiamo che al posto della viscosità troviamo il coefficiente K , definito come indice di consistenza, inoltre il valore del gradiente di velocità è elevato alla potenza n -esima, questo esponente esprime la tipologia di fluido non newtoniano, infatti se il valore di n risulta minore di 1 il fluido considerato sarà pseudoplastico, se maggiore di 1 sarà dilatante, mentre se n sarà uguale ad 1 si torna al caso newtoniano e il valore di K torna ad avere il significato di viscosità.[4]

Per poter ricavare i valori di K ed n per differenti tipologie di fluido occorre dapprima ricavare i dati dello sforzo per diverse intensità del gradiente di velocità, tramite l'utilizzo di viscosimetri, per poi elaborare i dati.

Il processo di elaborazione dei dati parte dalla definizione della PL e applicando il logaritmo ad entrambi i membri si ottiene:

$$\log(\tau) = \log(K) + n \log(\dot{\gamma}) \quad (1.4)$$

Rappresentando i dati ottenuti all'interno di un grafico con l'utilizzo della scala logaritmica si ottiene una retta descritta dalla funzione 1.4, dall'interpolazione dei dati si può ottenere il valore di K , l'intercetta con l'asse y , mentre il valore di n si otterrà valutando il coefficiente angolare della retta.[6]

1.4.2 Herschel-Bulkley

Come precisato in precedenza il comportamento del cioccolato presenta anche un limite di scorrimento, che la PL non permette di considerare, per questo viene aggiunto all'equazione il valore di τ_0 per poter considerare anche lo sforzo minimo da applicare per lo scorrimento, con l'aggiunta di questo valore si definisce il modello di Herschel-Bulkley.[6]

$$\tau = \tau_0 + k\dot{\gamma}^n \quad (1.5)$$

I valori di n e K hanno significato analogo a quello descritto per la PL, e assieme al valore di τ_0 possono essere definiti tramite interpolazione.

Questa equazione costitutiva risulta preferibile rispetto alla PL per poter modellare il comportamento del cioccolato, infatti presentando il limite di scorrimento nel modello sarà possibile rappresentare per il profilo di velocità una zona di flusso a pistone (*plug flow*), tipica dei fluidi con limite di scorrimento come il cioccolato.[6]

1.5 Numero di Reynolds

Per poter valutare il comportamento del fluido all'interno di un sistema che si vuole studiare, occorre poter definire la tipologia di moto che si instaura al suo interno, se questo è laminare o turbolento.

Per poter valutare il moto nel sistema viene introdotto un numero adimensionale, detto numero di Reynolds (Re), che rappresenta il rapporto tra l'inerzia e la forza viscosa nel moto del fluido.

Si presentano quindi due situazioni quando la forza d'inerzia ha ordine maggiore il numero di Reynolds sarà più elevato e si avrà un moto turbolento, mentre quando la forza d'attrito viscoso ha valori simili a quelli dell'inerzia, il numero di Reynolds indicherà un moto laminare.

I valori del numero di Reynolds per le diverse tipologie di moto sono da definire a seconda della geometria che si sta considerando, in particolare definendo Re per una tubazione cilindrica (1.6), si ha un moto laminare per $Re < 2100$ e un moto turbolento per $Re > 4000$, nella zona in cui i valori variano tra 2000 e 4000 si ha un moto incerto e per le applicazioni tecniche questa zona viene evitata, per via dell'impossibilità di prevedere il comportamento del fluido in maniera accurata.[4]

$$Re = \frac{\rho \cdot u \cdot D}{\mu} \quad (1.6)$$

Per poter calcolare il numero di Reynolds occorre conoscere la viscosità del fluido in esame, ma questa varia nel caso di fluidi non newtoniani, per ovviare a questo problema si ridefinisce Re introducendo le equazioni costitutive del caso specifico al suo interno.

$$Re_{PL} = \frac{\rho \bar{u}^{2-n} D^n}{K((3n+1)/(4n))^n 8^{n-1}} \quad (1.7)$$

$$Re_{HB} = \frac{\rho \bar{u}^{2-n} D^n}{(\tau_0/8)(D/\bar{u})^n + K((3m+1)/(4m))^n 8^{n-1}} \quad (1.8)$$

$$m = \frac{nK(8\bar{u}/D)^n}{\tau_0 + K(8\bar{u}/D)^n}$$

Le definizioni per la legge di potenza (1.7) e per il modello di Herschel-Bulkley (1.8) non presentano il valore della viscosità ma introducono i valori n , K e τ_0 nella definizione.

Capitolo 2

Composizione della miscela

Dopo aver definito nel capitolo precedente le proprietà reologiche dei fluidi e in particolare quelle delle sospensioni, come nel caso del cioccolato, si passa ora ad analizzare singolarmente i componenti della miscela, gli ingredienti che la compongono.

In questo capitolo verranno trattati il cacao, lo zucchero, il latte e gli emulsionanti, si presentano in conclusione anche i processi di miscelazione e dosaggio, questi sono inseriti all'interno del capitolo per comodità di comprensione, si è preferito dividere i processi che utilizzano un prodotto già composto, nel prossimo capitolo, da quelli che rendono possibile la formazione della miscela.

Ad ogni ingrediente sarà dedicato un paragrafo, nel quale si andranno a descriverne le proprietà, la derivazione e il processo di lavorazione industriale, quest'ultimo assume grande importanza nella trattazione perché permette di capire come in ogni singolo ingrediente siano sviluppate le proprietà che influenzano la reologia della sospensione.

2.1 Il cacao

Il cacao è tra i componenti della miscela certamente quello più iconico nell'immaginario comune, questo dona la tipica colorazione al cioccolato, ed è la fonte di moltissimi degli aromi caratteristici durante la degustazione.

Dal cacao vengono ricavati due componenti presenti nella sospensione, il burro di cacao e la polvere di cacao che appartengono rispettivamente alla fase continua e discontinua della sospensione.

Quello riportato di seguito è un esempio di filiera a cui può andare incontro la fava di cacao durante la produzione, anche se soprattutto nella parte finale possono essere introdotte numerose modifiche nell'ordine delle lavorazioni, infatti a seconda del rendimento desiderato nei diversi impianti si può lavorare sulla fava intera, sulla granella o sulla massa di cacao fluida.

La fava di cacao da cui si ricavano il burro e la polvere, è un seme contenuto nel frutto di tre particolari tipologie di alberi, che vivono principalmente nella zona tropicale e subtropicale, queste sono il Criollo, il Forastero e il Trinitario che differiscono tra loro per il sapore più o meno astringente delle fave e per la facilità di produzione.[3]

Nelle zone di raccolta le fave di cacao subiscono una fase di fermentazione, aerobica o anaerobica a seconda della casistica, che porta i semi a temperature di circa 50 °C. La fermentazione porta l'inattivazione della capacità di germinare dei semi, la liberazione della polpa zuccherina che li avvolge e lo sviluppo tramite la reazione di Maillard¹ di una serie di composti precursori di aroma.[9]

I semi vengono poi essiccati per bloccare la fermentazione allo stadio desiderato e per diminuire il contenuto di umidità all'interno della fava che passa dal 60% al 7% durante il processo.

L'essiccazione può essere portata a termine naturalmente lasciando le fave al sole per circa una settimana, a seconda delle condizioni meteo, o in alternativa può essere condotta all'interno di forni, nei quali viene fatta circolare aria riscaldata con l'utilizzo di combustori, in questo secondo caso occorre fare attenzione a non mettere mai a contatto diretto i fumi della combustione con i semi per non rovinarne le caratteristiche aromatiche.[3]

Le fave di cacao sono ora pronte per procedere alla fase di pulitura che comprende: depolverizzazione, spietatura, deferreizzazione e debatterizzazione, che eliminano ogni residuo inappropriato alla lavorazione alimentare.

Si passa successivamente alla fase di torrefazione, durante la quale le fave sono portate a temperature tra i 105 °C e i 180 °C per un lasso di tempo che varia tra i 5 e i 20 minuti a seconda delle caratteristiche della materia prima su cui si sta lavorando.

Nella fase di torrefazione dal punto di vista chimico continuano ad avvenire le reazioni di Maillard e si formano i composti aromatici tipici del cioccolato, oltre al pigmento caratteristico di color marrone che darà la colorazione finale al prodotto, dal punto di vista fisico invece abbiamo la volatilizzazione di alcuni composti aromatici e continua anche in questa fase la disidratazione della fava che porta la struttura ad un infragilimento.[5]

Il passaggio successivo, che può essere applicato alla fava intera o dopo la macinazione, è il processo di alcalinizzazione del cacao, in questa fase si utilizza una sostanza alcalina, il carbonato di potassio, che ha lo scopo di definire completamente il colore del pigmento del cacao e ottenere un prodotto meno acido migliorandone il gusto.

In questa fase è fondamentale controllare il dosaggio dell'alcalinizzazione, per non rischiare di avviare il processo di saponificazione dei grassi del burro di cacao, le percentuali indicate sono di circa lo 0,5-1% in peso di carbonato di potassio decaidrato.[5]

Dalla granella ottenuta si può procedere all'estrazione del burro di cacao, questa operazione può avvenire tramite pressatura, o estrazione con solvente, la seconda non verrà approfondita perché porta ad un risultato di scarsa qualità e non utilizzabile nell'industria alimentare, data la presenza di tracce di solvente anche dopo l'uscita dal processo.

Per la pressatura si parte da una massa di cacao avente circa il 50-55% di burro di cacao in massa e per estrarlo possono essere utilizzati differenti tipologie di macchinari, presse a vite continue (*expeller*) o a vasi, in entrambe le lavorazioni la massa di cacao è mantenuta all'incirca a 100°C e la pressione varia dai 300 ai 600 bar a seconda del prodotto che si vuole ottenere.

All'uscita dalla fase di pressatura otteniamo il burro di cacao puro e una massa risultante contenente circa il 10-12 percento di burro di cacao detta pannello.[3]

¹La reazione di Maillard, avviene tra uno zucchero e un gruppo amminico(proteine)

2.1.1 Polvere di cacao

Per ottenere la polvere di cacao che verrà poi utilizzata per la produzione del cioccolato, si parte dal pannello proveniente dalla pressatura, questo viene frantumato e successivamente polverizzato.

I processi avvengono all'interno di appositi mulini e frantumatori che provocando il riscaldamento della polvere fino a 30-40°C, occorre quindi predisporre un sistema di raffreddamento per poter stabilizzare i grassi ancora contenuti nella polvere, in modo da prevenire problemi legati a separazioni, che modificherebbero il colore della polvere rendendola grigiastra e di scarso interesse industriale.[1]

Alla fine della lavorazione la polvere di cacao si presenta come un fine particolato di colore rosso marrone, molto volatile, da conservare a temperatura ed umidità controllate.

All'interno della sospensione questo particolato solido andrà ad influenzare con il suo dimensionamento proprietà quali la viscosità e densità del composto.

2.1.2 Burro di cacao

Il burro di cacao ricavato dalla pressatura ha color giallo pallido e la sua composizione è fondamentale per poterne descrivere il comportamento.

Il burro di cacao è una miscela di gliceridi diversi, per questo non si può trovare un punto di fusione esatto, ma un intervallo di fusione, il burro di cacao infatti se riscaldato rammolisce tra i 27°C e i 30°C, mentre raggiunge la completa fusione nell'intervallo 33-35°C.

Considerando queste temperature a livello industriale quando si movimentava del burro di cacao allo stato fluido o durante le lavorazioni, si utilizzavano temperature tra i 40-45 gradi in alcuni casi addirittura superiori ai 50 per evitare solidificazioni improvvise.[5]

Un'importante caratteristica del burro di cacao è il polimorfismo che gli permette di assumere diverse strutture cristalline in fase solida, a seconda delle condizioni nelle quali la cristallizzazione viene portata a termine.

Assieme al polimorfismo il burro di cacao presenta anche un monotropismo, che rende una sola fase stabile in determinate condizioni e porta le altre fasi a trasformarsi in quella stabile.

Le forme cristalline del burro di cacao sono sei e hanno particolare importanza per definire la capacità termica, la lucentezza, la struttura e le temperature da utilizzare in fase di produzione.[1]

Le sei forme cristalline sono identificate con le lettere greche alfa(α), beta(β) per quattro di loro, e gamma(γ).

Come possiamo vedere dal grafico 2.1 le forme più stabili sono quelle β , tra queste però sebbene la β_1 sia in assoluto la più stabile, non è quella che viene ricercata per la produzione industriale, per ottimizzare le proprietà del prodotto finito infatti si predilige la forma β_2 .

Da questa proprietà di polimorfismo del burro di cacao nasce il processo comunemente definito tempra del cioccolato, che verrà approfondito nella sezione 3.3.

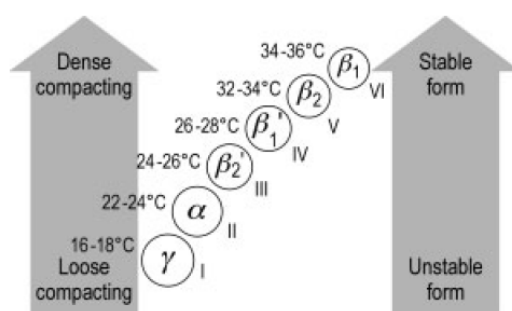


Figura 2.1

2.2 Zucchero e dolcificanti

Lo zucchero comunemente utilizzato per la preparazione dell'emulsione del cioccolato è il saccarosio, questo viene ottenuto tramite estrazione dalla barbabietola da zucchero ed è venduto con un grado di purezza tra il 99,9% e il 99,7%, assolutamente compatibile con la lavorazione nella produzione del cioccolato.

Il saccarosio si predilige, ad esempio rispetto al glucosio e al fruttosio, perché ha un comportamento meno igroscopico, la capacità di assorbire acqua infatti andrebbe a modificare le proprietà reologiche della sospensione, questa opzione viene utilizzata solamente in piccola scala per la produzione di cioccolato per diabetici, giustificata dall'indice glicemico più basso del fruttosio.[5]

In seguito vedremo che all'interno della sospensione è presente anche un'altra tipologia di zucchero, il lattosio, che viene inserito tramite il latte in polvere.

Lo zucchero sul mercato è disponibile in differenti granulometrie, come possiamo vedere in tabella 2.1, solitamente quella che si considera la più utilizzata nelle lavorazioni dell'industria del cioccolato è la grana media, con una dimensione del particolato tra gli 0,6 e 1 mm.

Nome	Dimensione(mm)
Zucchero Grossolano	1.0-2.5
Grana Medio	0.6-1.0
Grana Fine	0.1-0.6
Zucchero Cristallino	0.005-0.1

Tabella 2.1: Dimensioni particolato per zucchero commerciale

Lo zucchero all'interno della sospensione rappresenta la frazione più abbondante della parte discontinua, essendo presente per il circa il 50% in peso, la dimensione di questo particolato nella sospensione ha grande importanza per definire la viscosità della miscela.[5]

Dal punto di vista dello sviluppo degli aromi e del gusto lo zucchero influenza la dolcezza del cioccolato, ma può assumere anche il ruolo di vettore per altre tipologie di aromi, come nel caso di produzioni contenenti cioccolato con zucchero caramellato.

Volendo produrre cioccolato per diabetici invece oltre all'utilizzo già citato di fruttosio e glucosio si può propendere verso l'utilizzo di dolcificanti, in particolare il sostituto più utilizzato è il sorbitolo individuato come E420, oltre a questo in commercio sono disponibili anche dolcificanti molto più potenti come ad esempio l'aspartame o la saccarina che hanno potere addolcente di 200 e 500 volte maggiore rispetto al saccarosio.

I dolcificanti artificiali avendo potere addolcente molto elevato vengono introdotti in porzioni minori nella miscela, modificano quindi i rapporti tra la fase continua e discontinua, questo provoca un cambiamento nel comportamento reologico del fluido, che per poter esser lavorato in modo analogo a quello tradizionale, prevede addizionamento di latte in polvere proporzionale al miglioramento delle proprietà richieste.[5]

2.3 Latte

La tipologia di cioccolato più consumata a livello mondiale è quella al latte, da questo possiamo intuire l'importanza del latte all'interno dell'industria cioccolatiera, il quale solitamente rappresenta una percentuale in massa tra il 10% e il 20% della miscela totale. Nel cioccolato il latte viene aggiunto solitamente intero, ma questo deve essere sottoposto ad un processo di disidratazione, il latte vaccino infatti come rappresentato in tabella 2.2 è composto per l'87,5% di acqua, che deve essere eliminata fino ad ottenere una polvere che ne contiene il 5-6%.

Componenti	Latte intero	Latte intero in polvere
Acqua	87.5%	5.5%
Proteine	3.1%	25.5%
Grasso	3.8%	26.0%
Lattosio	4.8%	36.5%
Sali minerali	0.8%	6.5%

Tabella 2.2: Composizione del latte intero liquido e in polvere (% in peso)

I processi con cui industrialmente si disidrata il latte sono: il processo *spray* e quello *roller*, solamente solo il prodotto del secondo è considerato di buona qualità per la produzione del cioccolato.

Il processo *Spray* utilizza latte pre-concentrato che viene nebulizzato all'interno di un reattore, nel quale viene convogliata una corrente d'aria calda, il fine è quello di deumidificare la soluzione nebulizzata e permette di ricavare dal fondo della colonna il prodotto in polvere.

Anche se il processo *Spray* non rovina le caratteristiche per degradazione termica, porta ad ottenere una polvere composta di piccole sfere cave con la superficie porosa e la parte grassa racchiusa all'interno, proprio questa struttura rende poco disponibile il grasso del latte e provoca l'assorbimento del burro di cacao che peggiora la viscosità e plasticità della miscela.

Il processo *Roller* utilizza anch'esso latte pre-concentrato che viene essiccato su cilindri rotanti riscaldati a 130°C, ottenendo un latte in polvere che si presenta in scaglie, con una buona porzione di grasso disponibile, libero all'esterno.

L'ottenimento di questa struttura rende la polvere ottenuta dal processo *Roller* la migliore per l'utilizzo nell'industria cioccolatiera, anche se il latte *Spray* viene utilizzato maggiormente per il costo inferiore e la facilità di conservazione.

Il latte in polvere all'interno del cioccolato ha un duplice utilizzo, hanno particolare importanza infatti sia gli zuccheri del latte che i grassi introdotti.

Lo zucchero introdotto con l'aggiunta del latte in polvere è il lattosio, che è presente tra il 35 e il 50 per cento in peso, come possiamo vedere in tabella 2.2.

La quantità di lattosio necessaria viene regolata, assieme al saccarosio, in base alla dolcezza che si vuole ottenere nel prodotto finito.

Il lattosio è un disaccaride composto da glucosio e galattosio ed è presente in forma cristallizzata nella polvere, sono presenti due differenti forme α e β , entrambe non igroscopiche, ma la forma β risulta più stabile.[5]

Come già visto in precedenza in questa sezione, trattando i processi di produzione, il grasso presente nel latte in polvere può essere disponibile o meno all'esterno del particolato, questo varierà la viscosità della sospensione oltre ad influire su altri aspetti quali: il punto di fusione, che dipende della miscela di grasso della fase continua; dolcezza; amarezza e aromi, molti di questi sono liposolubili e vengono modificati dalla presenza dei grassi del latte assieme a quelli del burro di cacao.

Per ottenere un cioccolato di alta qualità la materia prima ideale è il latte in polvere ottenuto da latte vaccino intero, solitamente però si preferisce, per ragioni economiche, utilizzare quello scremato.

2.4 Emulsionanti

Per poter ottenere un cioccolato con le proprietà desiderate dall'industria è necessaria all'interno della sospensione l'addizione di un emulsionante, in particolare il più utilizzato è la Lecitina.

Gli emulsionanti sono sostanze chimiche in grado di stabilizzare un'emulsione, agiscono da tensioattivi, diminuendo la tensione superficiale tra le due fasi. Per poter partecipare ad entrambe le fasi gli emulsionanti presentano gruppi polari e apolari, in grado di legarsi rispettivamente nel caso del cioccolato: con l'acqua presente nel particolato e con i grassi presenti nella fase continua della sospensione.

Queste proprietà di idrofilia e lipofilia attribuiscono agli emulsionanti la funzione di tamponanti dell'effetto addensante dell'acqua.

La lecitina è un fosfogliceride ed è composta, come possiamo vedere in figura, nella parte apolare da due catene di acidi grassi insaturi di lunghezza variabile, esempi tipici di sostituenti sono l'acido oleico o linoleico, mentre la parte polare è formata da un gruppo fosfato legato ad una molecola di colina. Al centro della molecola ad unire le due parti troviamo il glicerolo, questo lega le due parti funzionali della molecola per condensazione.[1]

Questa sostanza viene ricavata solitamente dall'olio di soia o di girasole e si presenta come un particolato di dimensione variabile e colore tra il giallo e il marrone.

Esistono diversi processi per l'estrazione della lecitina dalla soia in particolare il più utilizzato è quello che prevede la preventiva estrazione con solvente dell'olio dalla soia e un successivo processo di separazione detto di degommaggio, durante il quale vengono

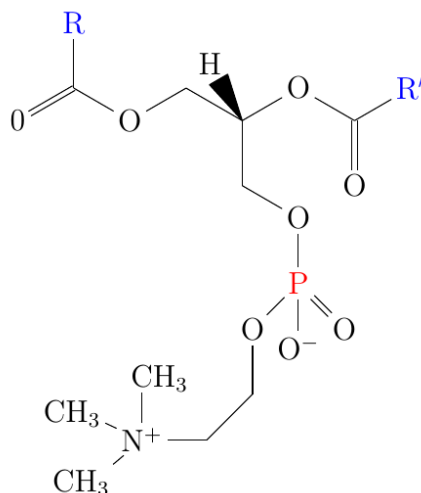


Figura 2.2: Formula di struttura della Lecitina

insuflati aria calda e vapore a 70 °C all'interno dell'olio.

L'aggiunta di acqua tramite il vapore porta la lecitina a formare dei coaguli nel grasso a seguito di un energica agitazione, che può durare tra i 30 e i 60 minuti, al termine della quale i coaguli possono essere filtrati con l'utilizzo di membrane o divisi per centrifugazione.

Sul prodotto ottenuto vengono eseguite una serie di lavorazioni successive per migliorarne la qualità come ad esempio la deodorazione, a seguito delle quali la lecitina ottenuta viene fatta essiccare e si può decidere se procedere o meno alla polverizzazione prima di poterla commercializzare.[1]

Solitamente la lecitina utilizzata nell'industria del cioccolato è composta per 60-70% da fosfolipidi e per il restante 30-40% da olio derivante dalla materia prima da cui viene estratta.[5]

La lecitina così prodotta viene inserita all'interno della sospensione del cioccolato durante o alla fine del processo di concaggio, come vedremo in seguito nella sezione 3.2, perché a quel punto della lavorazione l'emulsionante può essere utilizzato per correggere le proprietà della sospensione, regolando a seconda delle quantità aggiunte l'andamento della viscosità e del limite di scorrimento nel prodotto finito.

E' importante notare che la regolazione della lecitina è un processo di precisione, il calcolo della proporzione da introdurre nel prodotto finale è condizionato da diversi fattori quali: il grado di umidità, il contenuto percentuale di grasso e la finezza del particolato.

L'aggiunta dell'emulsionante in linea generale ha un impatto 10 volte superiore a quello del particolato solido, a parità di peso, sulla reologia finale della sospensione.[5]

2.5 Composizione del cioccolato

Una volta definite tutte le componenti del cioccolato e dopo aver introdotto le loro caratteristiche, si procede alle fasi di produzione e lavorazione della miscela, in particolare nella sezione 2.6.2 verrà trattata nel dettaglio la fase di miscelazione, mentre nel capitolo 3, si tratteranno le lavorazioni per l'utilizzo industriale.

Il cioccolato che troviamo in commercio è suddiviso classicamente in diverse categorie quali: il cioccolato fondente, quello al latte e il bianco, senza considerare le altre sottocategorie formate dalla presenza di particolari lavorazioni delle materie prime come possono essere il cioccolato caramellato o il gianduia.

Vengono di seguito riportate le composizioni delle tipologie classiche, secondo la norma vigente (All. I, D.lgs n. 178/2003) che definisce i prodotti del cacao e derivati per la messa in vendita sul territorio nazionale.

Il cioccolato bianco è definito come il prodotto ottenuto dall'utilizzo di almeno il 20 per cento di burro di cacao e il 14 per cento di sostanza secca derivante dalla lavorazione del latte, mentre il cioccolato al latte deve contenere il 20 per cento di cacao e il 20 per cento in peso di sostanza secca del latte, per quanto riguarda i grassi questi devono essere compresi nel 25 per cento del totale del peso.

Come possiamo notare all'interno della norma vigente non sono presenti specifiche particolari per l'identificazione del cioccolato fondente, di seguito sono riportate in tabella 2.3 alcune composizioni delle tipologie di cioccolato più consumate in Italia.

Ingredienti	Cioccolato fondente (70%)	Cioccoalto al latte	Cioccolato bianco
Pasta di cacao	68.5%	12%	/
Burro di cacao	2.5%	21%	26%
Zucchero	28.5%	41.5%	48.5%
Latte	/	25%	25%
Lecitina	0.45%	0.4%	0.5%
Aromi (Vaniglia)	0.05%	0.1%	0.1

Tabella 2.3: Composizione del cioccolato[5]

Da qui in seguito facendo riferimento ad una miscela di cioccolato, tranne quando indicato in modo diverso, si intenderà una sospensione definita dalle quantità di componenti indicate in tabella 2.3 per il cioccolato al latte.

Si ritiene importante utilizzare la composizione di questa particolare tipologia di cioccolato perché risulta la più utile ad individuare tutte le proprietà della sospensione.

Considerando le altre tipologie possono essere rilevate le seguenti problematiche: nel cioccolato bianco manca una parte del particolato, non presentando cacao in polvere al suo interno, di conseguenza parte delle proprietà reologiche derivanti dal questo saranno assenti, avremo quindi una caratterizzazione più simile a quella di un fluido newtoniano rispetto al caso in esame, mentre nel cioccolato fondente si ha una grande quantità di cacao in polvere, a discapito della frazione di zucchero che viene ridotta, questo implica un diverso comportamento del cioccolato al variare dell'umidità e della temperatura.[5]

Il cioccolato al latte in definitiva si identifica come il perfetto esempio per poter discutere nel modo più generale possibile le proprietà reologiche della sospensione, le nozioni descritte per questa tipologia restano comunque utilizzabili, con attenzione alle ipotesi da introdurre, nel caso del cioccolato fondente o bianco per descrivere anche sistemi con composizione diversa.

2.6 Dosaggio e miscelazione

A livello industriale le operazioni per la produzione della sospensione, partendo dalle componenti singole, sono il dosaggio e la miscelazione, queste due fasi possono essere condotte a seconda delle dimensioni dell'impianto in continuo o meno.

2.6.1 Dosaggio

Nei sistemi industriali una volta selezionata la ricetta, definita tramite le frazioni ponderali degli ingredienti, si procede al calcolo del quantitativo da produrre e si ottengono le quantità delle materie prime da utilizzare.

Il dosaggio industriale avviene tramite dosatori, costituiti da tramogge dotate di bilance, in grado di pesare automaticamente il materiale mentre viene introdotto nel processo di lavorazione.

I dosatori industriali presentano un errore nel dosaggio di circa 1% che sono solitamente variazioni trascurabili.[5]

2.6.2 Miscelazione

Il dosaggio degli ingredienti negli impianti più automatizzati avviene direttamente all'ingresso del reattore di miscelazione, questa opzione è la più utilizzata perché permette di velocizzare il processo e di diminuire lo spazio dedicato all'impianto.

Solitamente la miscelazione inizia con l'introduzione dei liquidi all'interno del reattore, i grassi e la massa di burro di cacao fusi vengono introdotti per primi, e successivamente si procede con l'introduzione dei solidi, questo ordine viene utilizzato per migliorare la miscelazione e diminuire l'insorgenza di grumi che andrebbero a compromettere la qualità del prodotto finale.

I miscelatori solitamente sono costituiti da un reattore ricoperto da una camicia esterna riscaldante, termostata con acqua, che permette la regolazione della temperatura, mentre per la miscelazione il reattore è dotato di organi meccanici molto robusti, per via dell'elevata viscosità delle materie prime.[3]

Il miglior rendimento possibile a cui si cerca di tendere è quello in perfetta miscelazione, che può garantire l'omogeneità della miscela, per cercare di avvicinarsi il più possibile all'idealità si utilizzano tempi di miscelazione variabili tra i 10 e 30 min, a seconda delle dimensioni del particolato dello zucchero introdotto.[5]

Ricordando che il cioccolato è una sospensione e quanto maggiore sarà l'omogeneità della distribuzione delle particelle al suo interno, tanto migliori saranno le proprietà della massa ottenuta, una distribuzione omogenea attribuirà all'impasto la plasticità necessaria per essere utilizzato nelle lavorazioni industriali successive.

Capitolo 3

Processi

All'interno di questo capitolo, dopo aver definito nel precedente la composizione del cioccolato, verranno trattati i processi che si applicano alla miscela per migliorarne le caratteristiche fisiche.

Nei paragrafi successivi verranno approfonditi nell'ordine i processi di raffinazione, concaggio e pre-cristallizzazione, mentre al termine del capitolo verranno descritti i test per la valutazione del grado di temperaggio e i sistemi di movimentazione e stoccaggio del prodotto finito.

3.1 Raffinazione

Il primo processo per la riduzione della dimensione del particolato è detto raffinazione, da cui il nome dei macchinari delegati all'operazione detti raffinatori o raffinatrici, nei quali la dimensione del particolato viene portata dai 100-300 micron in ingresso, fino al disotto dei 25 in uscita.[5]

Le raffinatrici industriali utilizzano lo sforzo di taglio per rompere il particolato in sospensione, questo sforzo viene applicato sul cioccolato da diversi cilindri posti in serie, che ruotano in direzioni opposte con velocità variabili.

I cilindri presenti in un impianto standard sono composti rigorosamente in acciaio inox, adatto per stare a contatto con gli alimenti.

Le raffinatrici, come possiamo vedere in figura 3.1, solitamente sono composte da una serie di 5 cilindri rotanti con diametri, velocità e distanze tra le superfici variabili, in particolare questo ultimo requisito geometrico, assieme all'accoppiamento tra le velocità dei cilindri, è la variabile utilizzata per la regolazione del processo.[1]

Alcune raffinatrici però differiscono da quelle illustrate sopra perché provviste di una sezione accessoria: utilizzate per produrre il cioccolato partendo da zucchero cristallizzato, di dimensioni superiori a quello già visto in precedenza, queste macchine sono provviste di due rulli accessori, posti a monte rispetto ai classici cinque, per poter avere una sgrossatura preliminare dello zucchero.

La fine regolazione tramite il distanziamento e la selezione della velocità però non sono sufficienti, infatti per poter garantire proprietà costanti nel prodotto passante per tutta la lunghezza del cilindro, occorre applicare a quest'ultimo una pre-deformazione caratteristica, bombandolo al centro.

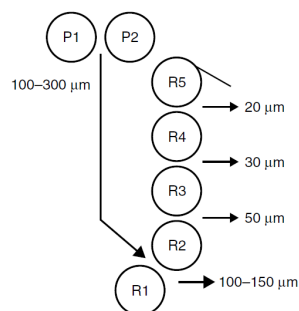


Figura 3.1: Schema raffinatrice a 5+2 rulli

Visto il grande sforzo cui sono sottoposti i cilindri, questi durante il moto risulteranno piatti e manterranno una sezione costante.[5]

Un altro fattore da considerare è l'eventuale eliminazione del calore prodotto per attrito dai rulli, che se non viene correttamente smaltito può portare il cioccolato a temperature troppo elevate provocando l'insorgenza di aromi indesiderati.

Questa lavorazione, diminuendo le dimensioni del particolato, porta la sospensione a variare le sue caratteristiche reologiche, infatti con l'aumento di superficie della fase discontinua si denota una diminuzione della plasticità, che in alcuni casi porta l'impasto a risultare quasi polveroso, per riportare le proporzioni a quelle ideali occorre l'aggiunta di altro grasso, che avverrà nella successiva fase di concaggio.

3.2 Concaggio

Per ristabilire le proprietà ottimali della sospensione si procede al concaggio, una fase molto lunga e delicata della lavorazione, durante la quale viene aggiunto il burro di cacao mancante ed eventuali emulsionanti per correggere il prodotto.

Durante la fase di concaggio il cioccolato viene continuamente agitato, per lunghi periodi e a temperatura controllata, in modo da permettere: l'eliminazione dell'aria, l'evaporazione di acqua e sostanze volatili indesiderate e l'arrotondamento delle particelle solide in sospensione, per migliorarne le proprietà reologiche.(Figura 3.2b)

Il macchinario industriale in cui avviene questa fase della lavorazione è detto conca, disponibile in commercio in diverse configurazioni: conche a secco, per lavorazioni a basse percentuali di acqua, conche a sfere, che utilizzano sfere in metallo per la lavorazione e conche-raffinatrici che raccolgono in un unico macchinario le due fasi di lavorazione.

Per questa trattazione viene descritto il sistema base di concaggio che permette di discutere comunque tutti i problemi del processo di conca.

La conca classica è composta da una vasca cilindrica in acciaio, termostata ad acqua, all'interno della quale una coppia di rulli in acciaio inox, di diametro poco superiore al livello del cioccolato nella vasca, vengono fatti ruotare da un meccanismo con moto circolare, come possiamo vedere in figura 3.2a.

La permanenza del prodotto all'interno della conca varia a seconda della lavorazione e può andare dalle 12 alle 72 ore, ad una temperatura tra i 60 e gli 80 gradi, per garantire la fluidità del burro.[5]

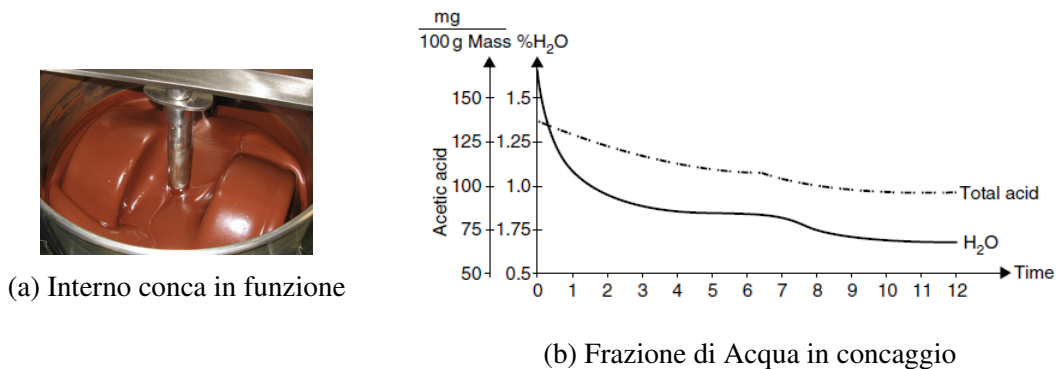


Figura 3.2

Queste temperature non possono essere superate, con il fine di aumentare la velocità di evaporazione del processo, perché così facendo si andrebbe incontro all'insorgenza di aromi indesiderati dovuti al cioccolato bruciato.

Il concaggio essendo un processo molto lungo, con un organo molto robusto sempre movimentato, risulta costoso dal punto di vista energetico, spesa che è giustificata dal miglioramento delle proprietà del composto che ne innalzano il valore commerciale.

Al termine del processo è possibile aggiungere un emulsionante, se necessario, solitamente questa fase è molto delicata, data la complessità del comportamento reologico della sospensione.

Industrialmente le ricette vengono messe a punto per tentativi, infatti con l'aggiunta di pochi grammi di emulsionante la reologia può cambiare repentinamente, come descritto nella sezione 2.4.

3.3 Tempra o pre-cristallizzazione

Il prodotto ottenuto dalla lavorazione, fino allo stadio di concaggio, presenta le caratteristiche desiderate dal punto di vista reologico e dei sapori sviluppati, ma deve essere ancora sottoposto al processo che garantirà al prodotto finito caratteristiche peculiari quali la lucentezza, la resistenza agli sbalzi termici, assieme ad altre che verranno trattati all'interno di questa sezione.

Il processo detto comunemente tempra del cioccolato utilizza le proprietà di polimorfismo e monotropismo del burro di cacao, come descritto nella sezione 2.1.2, per produrre all'interno della sospensione dei cristalli stabili.

Una particolarità del processo di cristallizzazione del burro di cacao è data dal fatto che le strutture cristalline che si formano nei processi di solidificazione restano instabili e distribuite omogeneamente nel volume, ma con il tempo migrano alla forma β più stabile. Da questo possiamo dire che il processo comunemente definito di tempra sarebbe più propriamente da definirsi di pre-cristallizzazione.

Il cioccolato durante questa lavorazione non raggiunge lo stato solido, ma è prevista la sola formazione di nuclei stabili all'interno del fluido, che poi verranno utilizzati nella cristallizzazione vera e propria, prevista a conclusione del processo di lavorazione.

Come già visto nella sezione dedicata al burro di cacao questo si presenta in differenti for-

me cristalline, ma la forma β risulta quella più compatibile con le esigenze sia industriali che di marketing per la vendita del prodotto finito.

Tra le caratteristiche della forma β abbiamo la brillantezza, la durezza, la manipolabilità, la conservabilità e la contrazione in solidificazione.

Se da un lato proprietà come il colore, la brillantezza e la conservabilità sono legate agli interessi di vendita e marketing del prodotto finito, altre come la manipolabilità, la durezza, la conservabilità e la contrazione in solidificazione sono di grande interesse industriale.

Volendo trattare le proprietà singolarmente, la brillantezza nel cioccolato solido temperato, ha interesse puramente estetico, proprietà comunque richiesta dal mercato e indispensabile per il prodotto finito, che non potrebbe essere commercializzato nel caso questo presenti macchie di grasso in superficie (Fat blooming¹).

La manipolabilità e la conservabilità influenzano invece notevolmente le scelte tecniche all'interno del processo, la prima definita dalla composizione è fondamentale per selezionare i macchinari adatti alla lavorazione o il loro settaggio, mentre la seconda consente di poter gestire i tempi di lavorazione anche in impianti che non lavorano in continuo.

Infine la contrazione in solidificazione trova la sua applicazione solo nelle fasi finali del processo, questa proprietà consiste nella diminuzione del volume del solido rispetto al fuso prima dello stampaggio di circa il 4-5%, questo risulta indispensabile per le operazioni di rimozione dagli stampi.

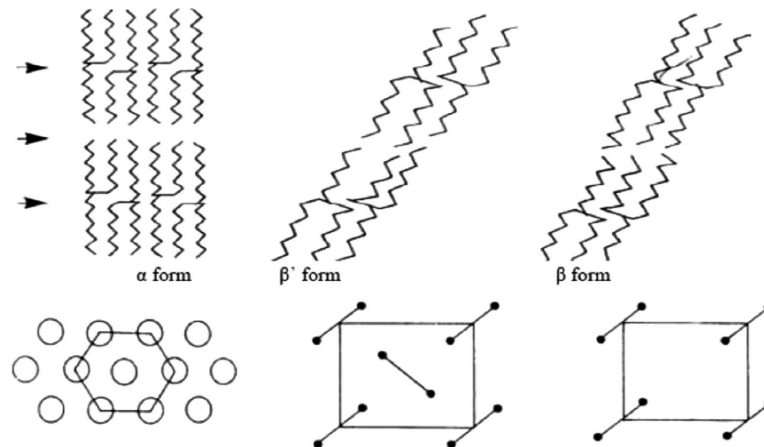


Figura 3.3: Strutture cristalline burro di cacao

La proprietà di contrazione dipende dalle differenti strutture che assumono le forme politropiche del burro di cacao durante la cristallizzazione, infatti il burro in forma β come possiamo vedere in figura 3.3 ha una struttura molto diversa dalla forma α , quest'ultima presenta delle catene avvolte nella lunghezza, che formano se visualizzate dall'alto un esagono, mentre le forme β e β' presentano una struttura con le catene più allineate.[1] La struttura allineata implica un minor spazio libero tra le catene, questo causa la proprietà

¹**Fat blooming:** Fenomeno in cui il burro di cacao non temperato emerge, per separazione, sulla superficie.[8]

di contrazione durante il raffreddamento, le catene della forma α infatti si modificano assumendo la conformazione β , contratta, che diminuisce il volume del prodotto finito.

3.3.1 Il processo di pre-cristallizzazione industriale

Il processo di pre-cristallizzazione industriale per la produzione di cristalli β stabili, rappresentato graficamente dal diagramma in figura 3.4, può essere descritto dividendolo in sei fasi, che avvengono all'interno di una macchina detta temperatrice.

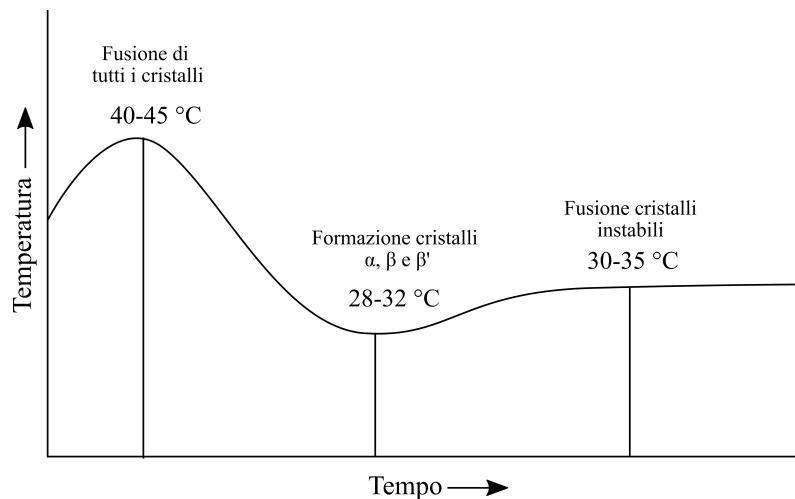


Figura 3.4: Diagramma temperature di pre-cristallizzazione

La prima fase consiste nell'eliminazione di eventuali precedenti cristallizzazioni subite dal cioccolato, dovute alle lavorazioni a monte nel processo.

Per la fusione di tutti i cristalli di burro di cacao presenti all'interno della miscela occorre che questa venga riscaldata a temperature tra i 40 e i 45 °C.

L'importanza di questa fase risulta cruciale quando all'interno del processo in continuo sono presenti delle polmonazioni al fine di gestire l'alimentazione della temperatrice, infatti queste polmonazioni anche se agitate e termostate, non essendo macchine ideali, possono portare alla formazione di alcuni centri di nucleazione, che è necessario eliminare prima dell'inizio del processo.[5]

Dopo l'eliminazione completa dei cristalli dalla miscela si procede al raffreddamento, questa fase porterà alla formazione di diverse tipologie di cristalli sia α che β .

In questa fase di raffreddamento la miscela viene portata ad una temperatura tra i 28 e i 32 °C per regolare la formazione dei cristalli β .

Lo scambio termico solitamente avviene utilizzando acqua di raffreddamento all'interno della temperatrice, la potenzialità dello scambio termico ha grande importanza nel controllo del processo, all'interno della fase di raffreddamento infatti il calore che viene scambiato è proporzionale all'area di scambio, la quale dipende dalla geometria della temperatrice, come vedremo in seguito nella sezione 3.3.2, dal tempo di permanenza del cioccolato e dalla portata d'acqua utilizzata per lo scambio termico.

La regolazione di questo passaggio deve essere molto fine, il controllo della formazione dei cristalli evita incidenti di produzione come il sovratemperaggio, questo porterebbe la miscela ad avere un aumento dei centri di cristallizzazione dovuto all'eccessivo raffreddamento, che andrebbe ad aumentare sensibilmente la viscosità della soluzione, costringen-

do a bloccare la macchina e a ricominciare dall'inizio il processo di tempra sulla massa di cioccolato in lavorazione.[5]

La terza fase prevede di riscaldare gradualmente la massa ottenuta per eliminare i cristalli di grasso instabili α e β' indesiderati, questo avviene aumentando la temperatura, portandola tra i 30 e i 35°C.

Il calore richiesto è composto di due componenti, il calore latente di cristallizzazione dei cristalli da eliminare e quello sensibile per riscaldare la miscela.

Per soddisfare la richiesta di calore del processo solitamente si utilizza nuovamente dell'acqua calda per lo scambio termico, anche in questa fase la miscelazione deve essere il più possibile ideale, sia per poter beneficiare di un migliore scambio termico, che per evitare l'effetto parete.

In condizioni di miscelazione non ottimali infatti si avrebbe una divisione in due zone nella tempratrice: quella vicina alla parete, in cui il processo avviene correttamente e quella della massa centrale più lontana, in cui i cristalli indesiderati permangono, vanificando così il processo.[5]

La quarta fase è dedicata alla crescita dei cristalli prodotti in precedenza, questa è detta di ritenzione e porta alla maturazione dei cristalli β stabili sia per numero, che dimensioni.

Le proprietà di utilizzo industriale sopra citate, come la contrazione in solidificazione, dipendono da questa fase del processo e in particolare il controllo delle dimensioni dei cristalli in uscita e il numero di centri di nucleazione, possono essere utilizzati come indice per prevedere le proprietà di contrazione.

Anche se questa fase, detta appositamente di ritenzione, avviene all'interno della tempratrice, occorre considerare che durante il processo a valle, nella movimentazione all'interno di tubazioni o pompe, il cioccolato continuerà questa fase di maturazione e di conseguenza occorrerà provvedere alla sua regolazione.[5]

Il penultimo step di produzione di cioccolato pre-cristallizzato consiste nella regolazione della temperatura in uscita dal processo, questa infatti differisce notevolmente a seconda delle lavorazioni successive a cui sarà sottoposto il cioccolato.

In questa fase il problema più significativo che si riporta è la regolazione della viscosità durante i processi di trasposto e lavorazione finale del prodotto, infatti da questa fase a venire, ogni abbassamento di temperatura della miscela comporterà, oltre ad un aumento della viscosità, l'impossibilità di utilizzare il cioccolato per la lavorazione desiderata senza prima riapplicare il processo di tempra completo.[5]

Infine l'ultima fase della pre-cristallizzazione forma un ciclo chiuso tra il processo di produzione e la tempratrice.

Il cioccolato prodotto nelle tempratrici, utilizzato nell'industria per il modellaggio, l'estrusione o la ricopertura, non viene mai consumato totalmente, questo però non può essere riciclato dopo l'utilizzato a temperatura ambiente, perché il processo di tempra è stato compromesso, per quanto detto in precedenza.

In questi casi occorre dotare l'impianto di un circuito di riciclo, che porta il cioccolato inutilizzato dai macchinari ad un reattore, posto a monte della tempratrice, dove il prodotto viene riscaldato come descritto nella prima fase, ma assieme al prodotto non ancora lavorato.[5]

Nell'analisi del processo di tempra nel suo insieme occorre sempre considerare oltre alle proprietà modificabili del processo, anche quelle del prodotto che si vuole ottenere, ad esempio le temperature citate in questo paragrafo sono compatibili con le produzioni di

cioccolato al latte, ma possono variare quando si utilizzano sospensioni diverse, uscendo dagli intervalli citati.

3.3.2 Tempratrici

Le fasi descritte nel paragrafo precedente industrialmente avvengono all'interno di macchine dette tempratrici o tempratrici, storicamente per la pre-cristallizzazione del cioccolato si utilizzava il metodo artigianale: questo consisteva nel prendere parte del cioccolato fuso, circa la metà, e raffreddarlo, per un breve periodo, spalmandolo manualmente con delle spatole su un piano a temperatura ambiente, solitamente in granito, per poi riunire questo composto, con all'interno i germi di cristallizzazione, con il restante lasciato da parte in precedenza, questo permetteva di ottenere il prodotto finito ad una temperatura intermedia sufficiente eliminare i cristalli inadatti.

I primi macchinari industriali per la tempra vennero prodotti per l'utilizzo in processi *batch*, ormai obsoleti per la grande industria, a partire da bollitori industriali, caldaie *kettles*, opportunamente modificate per poter garantire il controllo delle temperature nel range desiderato.

Le caldaie erano inoltre dotate di miscelatori e raschiatori della parete, in modo da ottenere una miscelazione quanto più possibile vicina all'idealità, mentre i tempi di permanenza all'interno di questi reattori era molto prolungati, infatti il processo poteva durare fino a 2 ore.[3]

Successivamente sul mercato vennero prodotti macchinari appositamente studiati per l'ottimizzazione dello scambio termico e la velocizzazione del processo, per poter rendere l'industria del cioccolato più redditizia.

Hosakawa Kreuter introdusse un nuovo standard a livello internazionale con l'introduzione sul mercato di un reattore dotato di pompa, per la ricircolazione del cioccolato durante il processo, che permetteva di migliorare la miscelazione e di adattare il processo per la produzione in continuo.[2]

Per abbattere i costi, giungendo alle tecniche più moderne di produzione, si utilizzano principalmente tre tipologie di macchinari, prodotti rispettivamente dalle aziende leader di mercato: il processo denominato "*K-procedure*", caratterizzato dall'utilizzo di una vite senza fine, il processo Aasted che utilizza piatti rotanti e quello Carle e Montanari con una tecnologia simile ai piatti rotanti ma con geometria modificata denominata "*Clamshell*". Il *k-procedure*, processo brevettato dalla Hosakawa Kreuter, utilizza condizioni con elevati sforzi di taglio abbinati ad alte pressioni, che si formano all'interno di presse a vite. L'attrito derivante dalla rotazione della vite senza fine in condizioni di elevata pressione permette di regolare la temperatura per la pre-cristallizzazione del composto, queste condizioni permettono di rendere il processo più rapido, abbassando i tempi di permanenza all'interno della macchina a qualche minuto, solitamente tra i 2 e i 6.

Il limitato tempo di permanenza del cioccolato all'interno della tempratrice permette di utilizzare il macchinario in condizioni di gradi produzioni, che variano da 1 a 5000Kg/h.[3]

Se il processo Hosokawa sfrutta l'elevato sforzo di taglio per la pre-cristallizzazione, il processo Aasted utilizza un sistema a piatti rotanti in serie, termostatati ad acqua, come in figura 3.5.

Il sistema è composto da uno statore costituito al suo interno da cavità cilindriche collegate tra loro, nelle quali ruotano dei raschiatori collegati ad un unico albero.

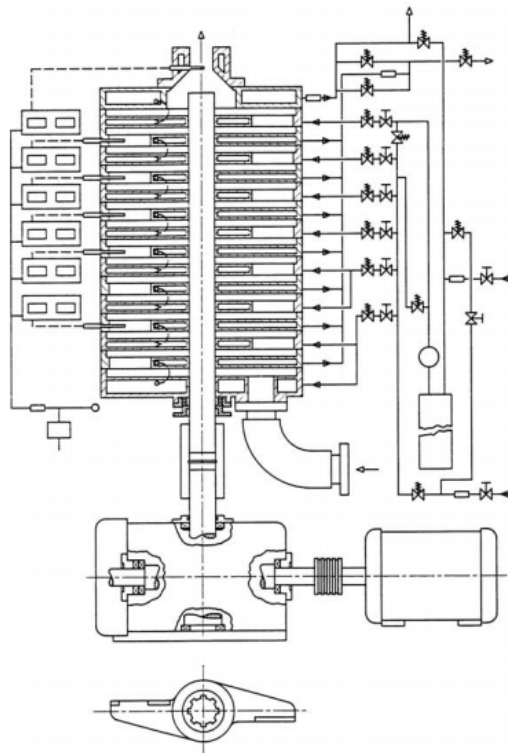


Figura 3.5: Tempratrice Aasted

Lo statore presenta al suo interno, scollegato dalle camere in cui passa il cioccolato, un sistema di scambiatori di calore ad acqua, con i quali viene regolata la temperatura nel processo.

Oltre alla geometria classica con questa tipologia di statori sono utilizzati, al posto dei classici raschiatori, in figura 3.6a, dei ruotismi composti da ingranaggi che raschiano le pareti delle camere (figura 3.6b).



(a) Raschiatore tempratrice Aasted classico



(b) Raschiatore tempratrice Aasted con ruotismi

Figura 3.6

Questa tipologia di tempratrice risulta la più apprezzata nell'industria per la molteplicità di variabili che possono essere utilizzate per la regolazione.

La macchina è in grado di controllare, tramite dei sensori, la pressione in ogni punto e lo sforzo applicato dai raschiatori, tramite un controllo all'albero, queste variabili assieme alla portata e temperatura dell'acqua di termostatazione sono utilizzate per la regolazione del processo.[3]

I brevetti sviluppati da Carle e Montanari al contrario di quelli Aasted hanno come fine quello di rendere semplici le procedure di manutenzione e pulitura della tempratrice. Il processo sviluppato dagli svizzeri infatti prevede il passaggio del cioccolato attraverso un sistema composto da due parti: un rotore sagomato e uno statore che fa da controsagoma come illustrato il figura 3.7.

Questa tipologia di tempratrice è denominata *Clamshell*, a conchiglia, proprio per il pro-

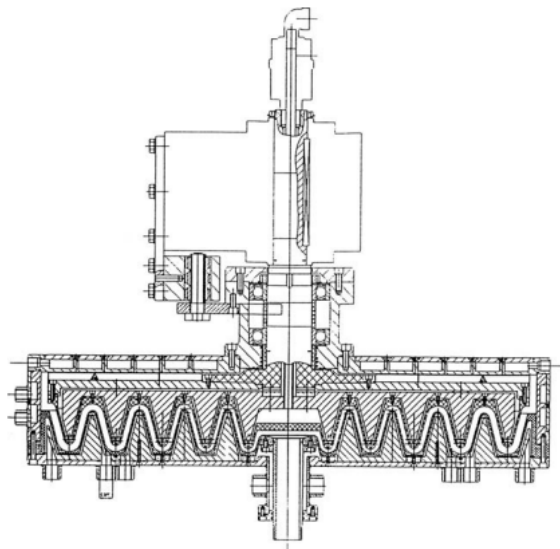


Figura 3.7: Tempratrice Carle e Montanari

filo che assumono i canali in cui viene fatto passare il cioccolato, questo infatti entrando al centro viene sottoposto tramite la rotazione a sforzi di taglio, inoltre regolando l'attrito e il sistema di termostatazione interna è possibile modificare la temperatura del prodotto. In questa particolare tipologia di impianto al regolazione risulta più complessa, infatti il cioccolato subisce sia variazioni di temperatura durante il passaggio dal centro alla periferia della tempratrice, che variazioni di volume specifico e pressione, questo è dovuto alla geometria che fa aumentare il volume disponibile durante il processo.

Carle e Montanari hanno sviluppato questa tecnologia per avere: un macchinario con una grande area di contatto per lo scambio termico, grazie al profilo dentato, una geometria che in rotazione richieda poca pressione per la movimentazione del prodotto, e un sistema semplice da ripulire.[3]

3.3.3 Movimentazione e stoccaggio

Il cioccolato una volta superato il processo di tempra è un prodotto molto sensibile a numerosi agenti esterni, quali la temperatura, l'umidità e oltre a questo il prodotto non può restare in quiete per lunghi periodi.

L'umidità per il cioccolato risulta una problema facilmente risolvibile nella produzione industriale, infatti il prodotto in uscita dalla tempratrice scorre all'interno di tubazioni chiuse fino ai macchinari per la lavorazione finale, questo previene i problemi che la sospensione può avere a seguito di un aumento della percentuale di acqua dovuta alle condense.[5]

Se il cioccolato anche dopo la fase di tempra viene lasciato in quiete, questo tende, sotto l'effetto della gravità, a separarsi e far emergere in superficie il burro di cacao più leggero, che ricopre il particolato più pesante che si deposita in basso.

Questo problema è facilmente risolvibile utilizzando direttamente il cioccolato temprato per la produzione, quando possibile, o in alternativa stoccandolo in sili termostatati e provvisti di pompe per la ricircolazione e miscelatori, questa seconda possibilità è però ben più costosa e si opta per applicarla solo se i periodi di stazionamento sono brevi.[3]

La temperatura del cioccolato durante la produzione gioca un ruolo chiave nella qualità del prodotto finito, questa deve essere regolata in modo da favorire la maturazione dei cristalli, per rendere più rapida la cristallizzazione finale del cioccolato.

La temperatura non può mai abbassarsi al di sotto dei 35 °C dopo il processo di tempra, se questo avvenisse il cioccolato aumenterebbe di viscosità e provocherebbe cristallizzazioni all'interno dei macchinari.

A livello industriale gli impianti possono essere gestiti in due modi differenti: in un caso si utilizzano tubazioni isolate non riscaldate, soprattutto quando le movimentazioni molto rapide o brevi in cui non si ha grande perdita di calore, mentre la seconda tipologia di tubazioni è quella incamiciata, termostatata con acqua calda, per percorsi più lunghi.

Se la prima tipologia di tubazione risulta più economica al momento dell'acquisto, non essendo dotata del sistema di movimentazione dell'acqua di riscaldamento e pompe correlate, risulta invece più ostica da gestire, infatti presenta più facilmente l'insorgenza di incrostazioni e per questo devono essere utilizzati sistemi appositi di pulizia come il *pigging* o lavaggi, nel secondo caso questo intervento solitamente obbliga a scartare il cioccolato presente nei tubi e parte della produzione durante la successiva messa in marcia dell'impianto.[3]

La movimentazione del prodotto allo stato fuso avviene con l'utilizzo di pompe, gli impianti utilizzano a seconda delle necessità pompe rotative, a vite, palette e a ingranaggi.

Le pompe scelte per la produzione di cioccolato devono obbligatoriamente presentare un corpo in movimento, per poter pulire la camera in cui passa il prodotto, in modo da non formare cristallizzazioni indesiderate all'interno, per questo sono molto apprezzate le pompe a vite, o a lobi e palette eccentriche.

Le pompe a differenza dei tubi data la scarsa permanenza del prodotto non sono dotate di camicia termostata, ma presentano un isolamento completo sulla superficie esterna.[3]

Come nel caso delle tubazioni anche nei silos di stoccaggio si utilizzano pareti isolanti e termostatate ad acqua, si possono avere sistemi a mezzo tubo o con contenitori concentrici.

3.3.4 Strumentazione per il controllo del grado di tempra

Per poter garantire la qualità finale del prodotto durante e a conclusione del processo di tempra deve essere applicato un controllo sistematico su quello che viene definito grado di tempra, cioè la percentuale in peso del grasso che cristallizza in forma β .

La qualità della tempra può essere valutata sul prodotto finito, tramite la valutazione di alcune caratteristiche, come già visto nel paragrafo 3.3, quali lecentezza, omogeneità o smodellaggio.

La valutazione sul prodotto finito non ha grande applicazione industriale, infatti il processo necessita di essere valutato quasi in tempo reale senza poter aspettare la cristallizzazio-

ne lenta², prevista per il prodotto finito, per questo possono essere utilizzati due differenti categorie di strumenti i temperometri che valutano la variazione della curva temperatura-tempo, e la DSC(*Differential Scanning Calorimetry*), che valuta le variazioni di calore del provino durante il raffreddamento.

Temperometro

Il temperometro, rappresentato in figura 3.8, è costituito da un elemento raffreddante(*Peltier element* o cella di Peltier)³, mantenuto elettricamente a temperatura costante e da una provetta portacampione di alluminio o rame, riempita con il cioccolato, al centro della provetta viene immersa, nel cioccolato, una sonda con un termometro per registrare le variazioni di temperatura.



Figura 3.8: Temperometro digitale

Durante il processo di raffreddamento e cristallizzazione lo strumento disegna una curva continuo tempo-temperatura, che presenta un flesso in corrispondenza del periodo in cui avviene la cristallizzazione, questa infatti liberando calore modifica l'andamento discendente della curva.[5]

Considerando il valore della derivata nel flesso possiamo valutare il grado di cristallizzazione del prodotto, in particolare, come possiamo vedere dal grafico in figura 3.9, si presentano 3 differenti curve che indicano i gradi di tempra: eccessivo, caso 1, perfettamente temprato, caso 2, ed insufficiente, caso 3.

Nel caso 1 il grafico presenta un flesso con derivata negativa, questo è indice di un prodotto eccessivamente temprato, la presenza di un numero troppo elevato di cristalli formati infatti implica una minore liberazione di energia durante la cristallizzazione.

Il caso 2 rappresenta la curva di perfetto temperaggio, infatti con la derivata prima nulla in corrispondenza del flesso, ci troviamo nel caso in cui il corpo raffreddante nel processo

²Il periodo varia tra i 15 e i 30 minuti.

³**Cella di Peltier:** Elemento termoelettrico che sfruttando l'effetto Peltier può selezionare la direzione di trasferimento del calore a seconda del verso della corrente continua ai capi dell'elemento.

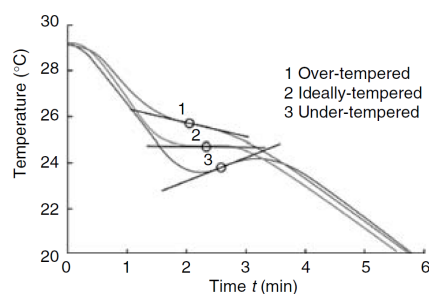


Figura 3.9: Diagramma tempo-temperatura di un temperometro

di cristallizzazione asporta la stessa quantità di calore prodotta nel processo, questo per come è calibrato lo strumento è indice di perfetta pre-cristallizzazione.

Nell'ultimo caso da considerare invece troviamo un flesso a derivata positiva, in questo caso infatti il calore liberato dalla cristallizzazione è addirittura maggiore di quello sottratto dallo strumento, indice della scarsa presenza di centri di nucleazione stabili nel prodotto, e quindi di una tempra insufficiente in fase di produzione.

Differential Scanning Calorimetry(DSC)

Il sistema DSC a differenza del temperometro rappresenta in continuo una curva di energia scambiata, sotto forma di calore, contro il tempo del processo.

Durante la cristallizzazione lo scambio di calore rappresenta una reazione esotermica, quindi nei grafici si analizzeranno questi valori rappresentati da dei picchi.

Il sistema DSC come il temperometro ha bisogno di avere dei valori di riferimento per poter valutare il grado dei campioni sottoposti al test, infatti le curve ottenute andranno confrontate con quelle standard.

La curva prodotta dalla DSC è caratterizzata dai picchi in corrispondenza della temperatura di cristallizzazione, il massimo si trova nel range di temperatura della forma β ma la curva finisce anche in altre forme che poi migreranno in seguito nella maturazione alla forma beta.

Valutando l'altezza dei picchi e quindi l'intensità del calore scambiato si possono ottenere le tipiche 3 casistiche elencate anche per il temperometro. Alla presenza nel grafico di un picco superiore ai valori standard nel campionamento si associa(caso 3) un grado di tempra insufficiente, infatti l'energia scambiata è superiore allo standard data la scarsa presenza di centri, al contrario se il picco è più basso di quello nella curva standard si ha un cioccolato sovratemperato e il picco ha valori minori perché nel prodotto sottoposto al test sono presenti più cristalli già formati di quelli desiderabili, nel caso in cui la curva si sovrapponga a quella standard si ha il prodotto pronto per la vendita e non occorrerà applicare nessuna modifica al processo.[3]

Solid Fat Index(SFI)

In conclusione ai metodi di analisi, correlata all'applicazione di queste due tipologie di strumentazione, viene valutata anche la curva SFI(Solid Fat Index) del burro di cacao (Figura 3.10), che permette di riconoscere ad una data temperatura qual'è la percentuale di grasso solidificato, l'analisi di questo dato viene utilizzata per poter valutare le proprietà

reologiche durante la lavorazione.[5]

Da queste curve si denota come sia fondamentale mantenere quanto più possibile con-

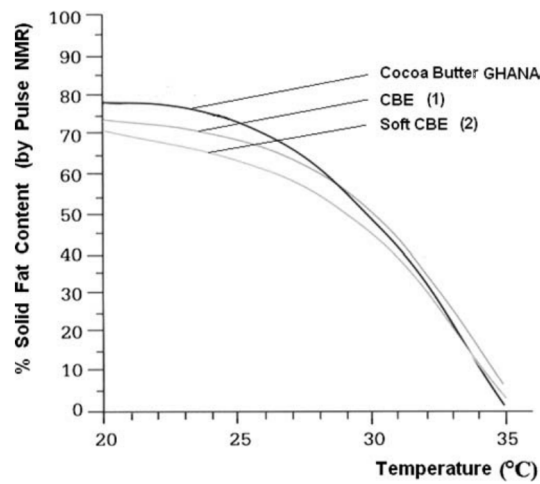


Figura 3.10: Grafico SFI: Solid Fat Index per burro di cacao

trollata la temperatura, considerando la pendenza della curva che provoca il repentino aumento della percentuale di grasso solido anche a pochi gradi di differenza.

Nel grafico possiamo capire come il passaggio a temperature anche poco inferiori ai 35 gradi, porti in pochi gradi il prodotto ad avere proprietà quali la viscosità o duttilità, molto più simili a quelle di un solido piuttosto che ad un fluido.

Capitolo 4

Modello

In questo capitolo finale verrà presentato un problema applicativo reale, riguardante il calcolo del profilo di velocità del cioccolato all'interno di una condotta. Dopo aver presentato il problema verranno introdotte le ipotesi fisiche necessarie per l'applicazione dei modelli al problema in esame, che nella parte finale della trattazione verranno risolti con successiva discussione dei dati ottenuti.

4.1 Presentazione del problema

Uno dei problemi comunemente affrontati all'interno dell'industria del cioccolato è quello della movimentazione del prodotto, in relazione al controllo termico di quest'ultimo durante l'intera lavorazione.

Contestualizzando il problema ad un'applicazione reale, si consideri di voler movimentare una portata di 4000 kg/h di cioccolato pre-cristallizzato, da una tempratrice ad un macchinario per la ricopertura di praline, questo trasporto avviene all'interno di una condotta cilindrica lunga 6 metri, avente diametro di 2 pollici e sezione costante, provvista di una pompa, il trasporto dovrà avvenire in condizioni isoterme a 36 °C, per non intaccare i processi con cui è stato trattato il cioccolato.

Lo scopo della trattazione è quello di ottenere il profilo di velocità del fluido all'interno della condotta per poterne valutare le caratteristiche in relazione alle proprietà reologiche.

4.2 Trattazione preliminare

Il sistema, rappresentato nel diagramma 4.1, risulta composto di due unità definite con A e B rispettivamente i due macchinari citati sopra, queste unità vengono considerate operanti alla pressione di 1 atm, inoltre la tubazione per tutta la sua lunghezza mantiene la stessa quota.

Per poter risolvere il problema si considera di applicare un modello su scala microscopica, questa scelta è giustificata dal fatto che il cioccolato alla temperatura in esame si presenta allo stato fluido e può essere trattato nella scala considerata come continuo, le discontinuità presenti infatti agiscono a livello inferiore, queste sono comunque considerate nella trattazione e vengono espresse all'interno delle equazioni costitutive, infatti modifiche alla composizione comportano la variazione delle variabili di modelli.

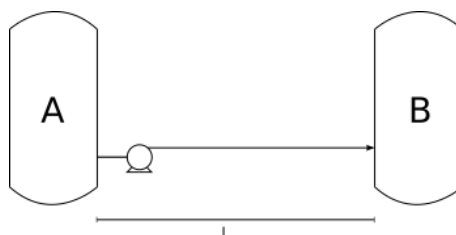


Figura 4.1

Per poter trattare il sistema in esame, si considera il cioccolato come una sospensione incompressibile, con caratteristiche non newtoniane pseudoplastiche, inoltre il sistema viene considerato isoterma ed in stato stazionario.

Il profilo di velocità all'interno della condotta in queste condizioni verrà calcolato nella zona in cui il flusso è completamente sviluppato. Si introduce ora un sistema di riferimento cilindrico per la condotta in esame, con origine posta al centro della sezione del tubo e direzione z positiva nel verso del moto del fluido, la direzione r viene considerata positiva verso il perimetro della sezione e la direzione θ in verso orario.

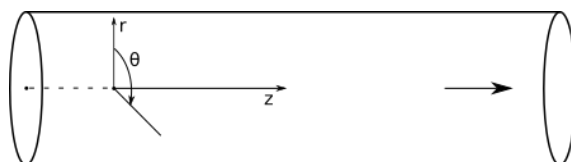


Figura 4.2

La velocità nel sistema di riferimento individuato è definita dal vettore 4.1, considerando il flusso all'interno della condotta cilindrica possiamo definire le velocità nelle direzioni θ e r mediamente nulle, mentre quella in direzione z dipende dal solo valore di r .

$$\mathbf{v} = (v_z, v_\theta, v_r) \quad (4.1)$$

Le variabili del sistema sono quindi definite nei domini indicati in tabella 4.1

Coordinata	Valore minimo	Valore massimo	Unità di misura
z	0	$L = 6$	m
r	$-D/2 = -0,0254$	$D/2 = 0,0254$	m
θ	0	2π	rad

Tabella 4.1

4.3 Risoluzione modello matematico

Una volta definito il sistema fisico, si procede ora all'applicazione al modello matematico delle ipotesi introdotte .

Per la risoluzione verranno utilizzate: l'equazione di continuità(4.2), le equazioni generali di Navier-Stokes(4.3), descritte in coordinate cilindriche, e le equazioni costitutive, rispettivamente nei due modelli che si andranno a sviluppare, quali la legge di potenza(PL)(4.4) e la legge di Herschel-Bulkley(HB)(4.5).

$$\frac{D}{Dt}(\rho) = -\rho[\nabla \cdot \mathbf{v}] \quad (4.2)$$

$$\rho \frac{D\mathbf{v}}{Dt} = -\nabla p - [\nabla \cdot \boldsymbol{\tau}] + \rho \mathbf{g} \quad (4.3)$$

$$\tau_{rz} = K(\dot{\gamma})^n \quad (4.4)$$

$$\tau_{rz} = \tau_0 + K(\dot{\gamma})^n \quad (4.5)$$

In particolare l'equazione di continuità e l'equazione di Navier-Stokes nella direzione z , risultano come riportato di seguito se espresse in coordinate cilindriche.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\rho r v_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta}(\rho v_\theta) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho v_z) = 0 \quad (4.6)$$

$$z : \rho \left(\frac{\partial v_z}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_z}{\partial \theta} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} - \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \tau_{rz}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \tau_{\theta z} + \frac{\partial}{\partial z} \tau_{zz} \right] + \rho g_z \quad (4.7)$$

Semplificando le equazioni utilizzando le ipotesi di: sistema isoterma, fluido incomprimibile e velocità nulla nelle direzioni diverse da quella diretta lungo l'asse z si ottengono le equazioni 4.8 e 4.9.

$$\frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad (4.8)$$

$$z : 0 = -\frac{\partial p}{\partial z} - \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \tau_{rz}) \right] \quad (4.9)$$

Una volta definita l'equazione di Navier-Stokes (4.9), introducendo le equazioni costitutive e le condizioni al contorno: la condizione di non scivolamento (*no-slip condition*) e di velocità massima all'inizio della sezione di plug flow per la HB e al centro della condotta per la PL si ottengono.

$$v_{z,PL} = \left(\frac{\Delta P}{2K_{PL}L} \right)^{\frac{1}{n_{PL}}} \frac{n_{PL}}{n_{PL} + 1} \frac{R^{(\frac{1}{n_{PL}}+1)} - r^{(\frac{1}{n_{PL}}+1)}}{\frac{1}{n_{PL}} + 1} \quad (4.10)$$

$$v_{z,HB} = \left(\frac{\Delta P}{2K_{HB}L} \right)^{\frac{1}{n_{HB}}} \frac{n_{HB}}{n_{HB} + 1} \left[\left(r_0 - \frac{2L}{\Delta P} \tau_0 \right)^{\frac{n_{HB}+1}{n_{HB}}} - \left(R - \frac{2L}{\Delta P} \tau_0 \right)^{\frac{n_{HB}+1}{n_{HB}}} \right] \quad (4.11)$$

4.3.1 Calcolo profilo velocità

Una volta definite le equazioni dei profili di velocità, queste possono essere applicate al problema in esame introducendo le variabili richieste.

Il sistema viene considerato isoterma alla temperatura di 36°C, queste condizioni vengono utilizzate per la valutazione dei valori di K_{PL} ed n_{PL} per la PL e di τ_0 , K_{HB} ed

Legge di Potenza (PL)			Herschel-Bulkley (HB)		
T[°C]	$K_{PL}[\text{Pa}\cdot\text{s}^{-n}]$	$n_{PL}[\text{adim}]$	$\tau_0[\text{Pa}]$	$K_{HB}[\text{Pa}\cdot\text{s}^{-n}]$	$n_{HB}[\text{adim}]$
36	13.358	0.494	9.103	5.760	0.697
38	12.237	0.493	9.343	4.523	0.736
40	10.720	0.527	9.390	3.938	0.756
42	10.404	0.518	9.056	3.754	0.750
44	10.294	0.505	8.842	3.650	0.741

Tabella 4.2

n_{HB} per HB, questa avviene come descritto nel capitolo 1.4 e si ottengono, partendo da dati di letteratura[10], i valori riportati nella tabella 4.2.

Prima di procedere al calcolo delle perdite di carico (ΔP) per i due modelli, occorre definire la tipologia di flusso all'interno della condotta, tramite il calcolo dei numeri di Reynolds modificati, come descritto nella sezione 1.5.

Utilizzando le formule riportate 1.7 e 1.8 si ricavano nelle condizioni del problema in esame i valori riportati in tabella 4.3.

Numero di Reynolds	
Re_{PL}	Re_{HB}
16,2	15.0

Tabella 4.3

Come possiamo vedere con il sistema a 36°C il numero di Reynolds risulta molto basso in entrambi i casi, garantendo il moto laminare che si vuole andare ad analizzare, questo infatti ha un valore minore di 2100, il limite che porta il flusso fuori dalla zona laminare in condotta cilindrica.

Una volta definita la tipologia di flusso, occorre individuare il profilo in una sezione della condotta in cui questo sia completamente sviluppato, non si avranno quindi nel profilo finale gli effetti di turbolenza dovuti alla geometria dell'ingresso nella condotta, per selezionare la coordinata z da utilizzare occorre valutare la semplice equazione per il moto laminare 4.12.

$$l_e = 0.06 \cdot Re \cdot D \quad (4.12)$$

Il flusso si identifica come completamente sviluppato e privo di turbolenze dovute alla zona di ingresso dopo circa 5 centimetri in entrambi i casi, il profilo potrà quindi essere calcolato in qualsiasi punto della condotta dopo l_e .

Ultima variabile che rimane da definire prima di poter ottenere i profili di velocità nella condotta è il valore di ΔP .

Il calcolo delle perdite di carico dei due modelli viene eseguito seguendo la procedura che prevede una stima del fattore d'attrito(f) tramite l'utilizzo del numero di Reynolds (4.13) modificato per il modello considerato, per poi procedere al calcolo delle perdite di carico

utilizzando l'equazione 4.14.

$$f_{PL/HB} = \frac{64}{Re_{PL/HB}} \quad (4.13)$$

$$\Delta P = f_{PL/HB} \frac{L}{D} \frac{\rho \bar{u}^2}{2} \quad (4.14)$$

4.4 Discussione risultati

Una volta calcolate tutte le variabili necessarie per definire la curva del profilo di velocità è possibile rappresentare i risultati graficamente.

Per la trattazione delle rappresentazioni grafiche da questo punto a seguire verranno rappresentate in rosso le curve ricavate con l'utilizzo della PL mentre in blu quelle di HB.

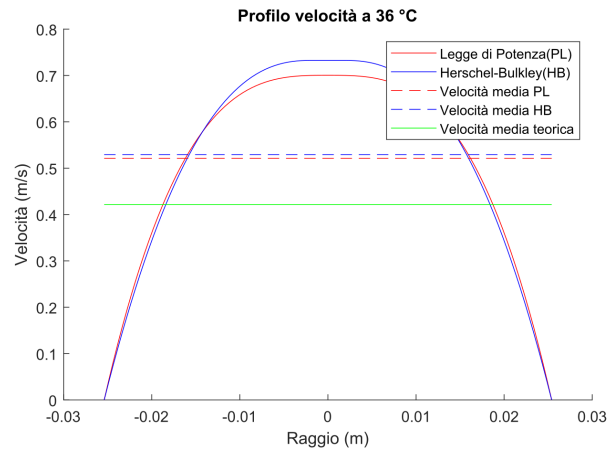


Figura 4.3

I profili, grafico 4.3, descritti dai due modelli presentano entrambi un andamento a parabola, schiacciato nella parte centrale, tipico dei fluidi pseudoplastici, questo andamento è definito dal valore dell'esponente n , che essendo minore di 1 schiaccia il grafico nella parte centrale.

I due grafici, ottenuti a partire dagli stessi dati sperimentali, risultano molto simili tra loro, questo ci porta a considerare anche la PL come una buona approssimazione preventiva per valutare un sistema che presenti limite di scorrimento.

La discrepanza principale tra i due modelli risiede nella loro stessa definizione, infatti la PL anche se approssima nella zona centrale della condotta un profilo piatto, ha comunque la derivata prima diversa da 0 in ogni punto e non si può quindi definire un *plug flow*, mentre la HB presentando un limite di scorrimento porta ad ottenere una zona centrale senza variazioni di velocità, in particolare la dimensione di questa zona è tanto maggiore quanto più grande è il limite di scorrimento del fluido considerato, questa varia anche con la dimensione del condotto.

Nella zona del *plug flow* il profilo della velocità non varia, perché lo sforzo applicato al fluido è minore del limite di scorrimento e quindi non permette il trasporto di quantità di moto in direzione perpendicolare al trasporto convettivo.

Altro fattore di interesse nella comparazione dei due grafici è l'andamento con cui questi raggiungono la velocità massima, i profili rimangono sovrapponibili per tutta la parte lontana dal flusso a pistone, nella parte centrale infatti notiamo che la HB presenta velocità massima maggiore, nel grafico 4.3 riportate con un tratteggio troviamo le velocità medie dei due modelli, i due valori riportati sono molto simili, e in linea con le norme di accettabilità dei risultati per la movimentazione di fluidi viscosi, queste non superano il metro al secondo e sono tali da garantire il mantenimento di un moto laminare.

Dai dati ricavati per il problema si riscontra una discrepanza tra le velocità medie calcolate per i due modelli e quella calcolata tramite la definizione di portata volumetrica. La causa di questa discrepanza se ricercata a ritroso valutando i termini del modello, porta a riscontrare un errore nel calcolo delle perdite di carico, queste infatti sono ottenute tramite la definizione di un fattore d'attrito, derivato per il moto laminare utilizzando il numero di Reynolds, che nelle sue definizioni modificate risulta non sempre stabile.

Dai risultati ottenuti si riscontra una discrepanza di circa il 12% tra la perdite di carico reale e quella stimata, proprio questo errore di sovrastima porta il grafico per come definito nelle equazioni 4.10 e 4.11 ad avere un profilo con velocità maggiori: vediamo come l'errore di sovrastima della perdita di carico viene amplificato nel calcolo del profilo di velocità, questo infatti elevato alla $1/n$ con il valore di n nell'esponente di circa 0,4 porta ad un amplificazione dell'errore.

Il sistema di equazioni designato per il calcolo presenta una sovrastima riconosciuta anche a livello di letteratura accademica, per i sistemi a bassissimi numeri di Reynolds, valore riconducibile alla discrepanza emersa nel modello in esame.[7]

I numeri di Reynolds modificati infatti non risultano perfettamente stabili all'interno di tutti i range di utilizzo: la loro attendibilità aumenta e l'errore diventa eliminabile dal problema quando Re supera il valore 100.[11]

Questa discrepanza è dovuta alla formulazione stessa del numero di Reynolds modificato, infatti se una parte di questo è ottenuto tramite l'utilizzo delle equazioni costitutive, che introducono i valori di K ed n , una parte è di derivazione prettamente sperimentale, ad esempio i termini $(3n+1)^n/(4n)^n$ e 8^{n-1} del numero di Reynolds per la legge di potenza sono, nel primo caso un'approssimazione del comportamento pseudoplastico del fluido, ottenuta approssimando il risultato sperimentale con una funzione iperbolica, il secondo termine sempre ottenuto sperimentalmente è di derivazione geometrica, in particolare il valore 8 identifica la condotta cilindrica.[7]

Si consideri inoltre che questa definizione del numero di Reynolds ha il primo termine che può essere considerato valido solo per valori di n compresi tra 0,4 e 1.[7]

L'introduzione di approssimazioni sperimentali all'interno della definizione portano alla sovrastima di Re , che si ripercuote sul calcolo del fattore di attrito e di conseguenza sulle perdite di carico calcolate per la condotta, ragionamenti analoghi possono essere applicati anche per il modello che utilizza l'equazione costitutiva di HB, valutando i termini introdotti nella definizione dello specifico numero di Reynolds modificato.

Il modello ottenuto risulta quindi utilizzabile per valutare in modo accurato i profili di velocità per numeri di Reynolds superiori al centinaio, nel caso di valori di Re molto bassi il modello può essere utilizzato per valutare il disegno dei profili e risulta comunque utilizzabile in questi range come base a cui aggiungere le opportune misure sperimentali per valutarne l'attendibilità, ottenibili ad esempio tramite impianti pilota.

Il dimensionamento meccanico del condotto risulta accettabile, in particolare si è scelta una tubazione di 2 pollici in acciaio inossidabile alimentare AISI 306, per la sem-

plicità nella reperibilità e per poter garantire gli standard igienici per un'azienda nel ramo alimentare, al suo interno il moto del fluido rimane prettamente laminare e la lunghezza di sviluppo molto bassa, in particolare nel caso in esame dopo 5 cm il flusso è completamente sviluppato e possono essere già riscontrate le condizioni di applicabilità del modello.

Una volta definiti per la temperatura di utilizzo a 36 gradi centigradi, si procede allo studio delle variazioni dei profili di velocità al variare della temperatura, in particolare si andranno a studiare le condizioni di processo alla temperatura di 38, 40, 42 e 44 gradi centigradi.

Per il calcolo dei profili di velocità si utilizzano per il calcolo delle variabili K ed n , riportate in tabella 4.2, i dati ricavati in letteratura[10].

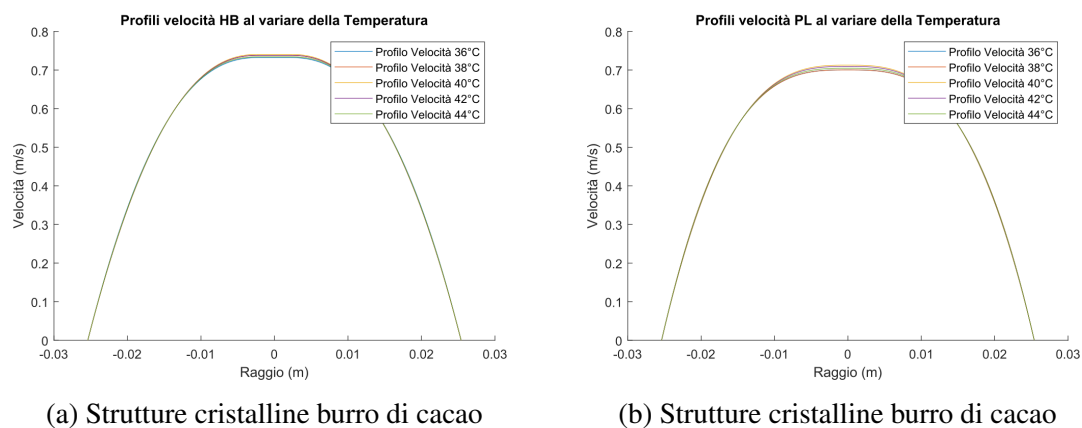


Figura 4.4: Strutture cristalline burro di cacao

Come possiamo vedere dai grafici 4.4a e 4.4b, la variazione di temperatura nel sistema modifica i valori delle equazioni costitutive 4.2 e di conseguenza anche quelli del profilo di velocità, in particolare con l'aumento della temperatura si ha una diminuzione della viscosità, che comporta un aumento di Re (grafico 4.5c) con conseguente calo del fattore d'attrito (grafico 4.5b), delle perdite di carico (grafico 4.5a) e di conseguenza si ha un aumento della velocità nel profilo, anche se questa variazione non è molto marcata nei

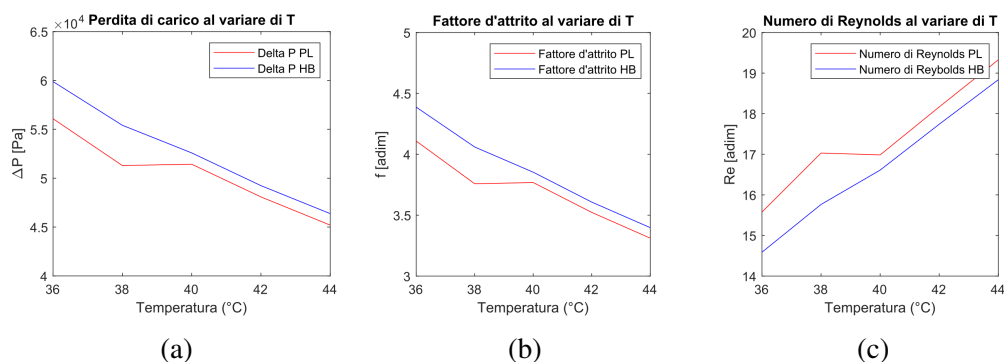


Figura 4.5

range considerati è comunque individuabile.

Il numero di Re ha una variazione minima tra le temperature considerate e rimane molto

basso, garantendo ampiamente il moto laminare, inoltre anche per le temperature diverse da 36 gradi si ritrova la sovrastima già discussa per le perdite di carico, che avendo entità molto simile tra le temperature risulta eliminabile per la trattazione della variazione dovuta alla sola temperatura.

Conclusioni

Il modello ricavato e discusso nella sezione precedente risulta non solo applicabile alle condizioni del problema posto in esame ad inizio del capitolo, ma può essere utilizzato anche per la risoluzione di sistemi e fluidi diversi.

Nella trattazione sono stati presentati i due modelli con l'utilizzo della legge di potenza ed Herschel-Bulkley, queste equazioni costitutive sono state selezionate tra le molte a disposizione per la trattazione di fluidi non newtoniani per la loro flessibilità nelle applicazioni. I due modelli sono contraddistinti dal limite di scorrimento che è presente solamente nella HB, e sono stati presentati in coppia per confrontare i risultati che permettono di ottenere.

Si può pensare ad esempio di utilizzare la legge di potenza per lo studio preliminare di un sistema, per la semplicità nella risoluzione, per ottenere un risultato preliminare, per procedere poi quando già si conosce il problema all'applicazione della HB e nel caso risulti necessario anche di altre equazioni costitutive più specifiche per il problema o il fluido in esame.

I modelli presentati non si limitano quindi al campo dei fluidi pseudoplastici ad alta viscosità, ma possono se opportunamente modificate essere applicate a qualsiasi tipologia di fluido non tempodipendente, nelle condizioni in cui siano soddisfatte la stazionarietà del sistema, la sua isothermicità e l'incomprimibilità del fluido considerato.

Per la modifica del modello occorre prestare particolare attenzione al variare del numero di Reynolds che descrive il moto all'interno della condotta, questo infatti per mantenere la validità del modello dovrà definire il moto come laminare, inoltre è consigliabile il suo utilizzo per valori superiori al centinaio per garantire la stabilità.

I modelli presentati possono quindi essere utilizzati per innumerevoli applicazioni anche molto lontane da quelle presentate in questa trattazione legata all'industria alimentare.

In conclusione occorre sottolineare come occorra sempre sottoporre il fluido ad analisi sperimentali con viscosimetri adatti al range di utilizzo per la valutazione dei dati con cui calcolare le variabili, inoltre è importante conoscere il comportamento del fluido all'interno del range di utilizzo e nel suo intorno, per evitare cambiamenti di comportamento che nullificano l'utilità del modello sviluppato, il quale non può essere utilizzato per estrapolare dati all'esterno del dominio dei dati strumentali con cui è stato generato.

Bibliografia

- [1] "Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. Wiley-VCH, 2000.
- [2] Stephen T Beckett. *The science of chocolate*. Royal Society of Chemistry, 2019.
- [3] Stephen T Beckett, Mark S Fowler, Gregory R Ziegler, et al. *Beckett's industrial chocolate manufacture and use*. Wiley Online Library, 2017.
- [4] R Byron Bird. Transport phenomena. *Appl. Mech. Rev.*, 55(1):R1–R4, 2002.
- [5] Ernesto G Carrega. *Cacao,cioccolato e affini, manuale di produzione per tecnici dell'industria alimentare*.
- [6] Raj P Chhabra and John Francis Richardson. *Non-Newtonian flow and applied rheology: engineering applications*. Butterworth-Heinemann, 2011.
- [7] Florent Delplace and JC Leuliet. Generalized reynolds number for the flow of power law fluids in cylindrical ducts of arbitrary cross-section. *The Chemical Engineering Journal and The Biochemical Engineering Journal*, 56(2):33–37, 1995.
- [8] Imogen Foubert, IV Cauteren, Koen Dewettinck, and André Huyghebaert. Differential scanning calorimetry as a means of predicting chocolate fat-blooming. *Crystallization and Solidification Properties of Lipids. United States of American: AOCS Press*, 6:79–86, 2001.
- [9] Tomy J Gutiérrez. State-of-the-art chocolate manufacture: a review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 16(6):1313–1344, 2017.
- [10] Vojtěch Kumbár, Šárka Nedomová, Sylvie Ondrušíková, and Adam Polcar. Rheological behaviour of chocolate at different temperatures. *Potravinarstvo*, 12(1), 2018.
- [11] Klaus Madlener, Benjamin Frey, and HK Ciezki. Generalized reynolds number for non-newtonian fluids. *Progress in Propulsion Physics*, 1:237–250, 2009.
- [12] Tharwat F Tadros. Emulsion formation and stability. *Environmental Engineering and Management Journal*, 13(3):759–760, 2014.