



UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE

**TESI DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA CHIMICA
E DEI PROCESSI INDUSTRIALI**

**STUDIO SULLA MACINAZIONE DEL CAFFE' IN
APPARECCHIATURE PER LA RISTORAZIONE**

Relatore: Prof. Andrea Claudio Santomaso

Laureando: ALBERTO DOMASCHI

ANNO ACCADEMICO: 2011-2012

Riassunto

In questa tesi si è studiato il processo di macinazione dei chicchi di caffè al livello di esercizi pubblici per la ristorazione. Il problema in particolare preso in esame riguarda la regolarità della dose di polvere ottenuta, per mantenere elevata la qualità del prodotto finale.

Il dosaggio della polvere deve essere adeguatamente calibrato, agendo sulle due variabili operative disponibili: la "tacca" per la macinazione del caffè ed il tempo di macinatura.

La regolazione è intuitiva, ma non così facile poichè oltre alla variabilità intrinseca del processo, si devono aggiungere le forti differenze tra le varie miscele di caffè che si possono utilizzare (qualità, tostatura, etc...), le condizioni ambientali (umidità principalmente); inoltre, la polvere di caffè nel processo si carica elettrostaticamente per sfregamento (*triboelettificazione*), aderendo ai componenti della macchina e impedendo un flusso regolare del materiale. E' stato fornito il macinacaffè con vari set di macine e due qualità differenti di materiale (miscele robusta ed arabica).

Dopo le analisi, è stata proposta e verificata una teoria che spiega il fenomeno di deposizione della polvere, che genera oscillazioni nella dose di macinato. Per risolvere il problema sono state proposte e testate due soluzioni: un otturatore basculante ed una rete metallica poste in uscita alla camera di macinazione, che hanno la funzione di compattare la polvere.

Non è stato possibile approfondire l'analisi sulla tribologia e sull'usura delle lame, poiché lo studio richiede molto tempo, una stima di un quintale di chicchi di caffè da macinare e non ha definitivamente interesse pratico.

Indice

Introduzione	1
Capitolo 1 – Cenni Introduttivi sul Caffè	3
1.1 Storia	3
1.2 Biologia	3
1.3 Le varietà	4
1.4 Qualità del chicco	5
<i>1.4.1 Ambiente</i>	5
<i>1.4.2 Varietà, aspetti genetici</i>	5
<i>1.4.3 Pratiche colturali</i>	7
1.5 Lavorazione	8
<i>1.5.1 Raccolto</i>	8
<i>1.5.2 Lavorazione del prodotto raccolto</i>	9
<i>1.5.3 Essiccazione</i>	9
1.6 Tostatura	11
<i>1.6.1 Effetti tostatura</i>	12
1.7 Macinazione	13
<i>1.7.1 Teoria</i>	13
<i>1.7.2 I macinini</i>	14
<i>1.7.3 Effetti macinazione</i>	15
<i>1.7.4 Metodi di misurazione della granulometria</i>	16
<i>1.7.5 Variabili della macinazione</i>	17
1.8 Percolazione	18
<i>1.8.1 Processo estrattivo</i>	18
<i>1.8.2 Parametri della percolazione</i>	20
Capitolo 2 – Strumentazione e Materiali	21
2.1 Macinino	21
<i>2.1.1 Macine in acciaio</i>	23
<i>2.1.2 Macine in ceramica</i>	23
2.2 Caratterizzazione polveri	25
<i>2.2.1 PSD</i>	25

2.2.2 <i>Misure cella di shear</i>	27
Capitolo 3 – Prove Preliminari	29
Capitolo 4 – Analisi Sperimentale	39
4.1 Variabili operative	39
4.2 Curve parametriche	42
4.2.1 <i>Metodo d'analisi</i>	42
4.2.2 <i>Risultati macinato</i>	43
4.2.3 <i>Risultati residui</i>	44
4.3 Macine	45
4.3.1 <i>Risultati macine in acciaio</i>	45
4.3.2 <i>Risultati macine in ceramica</i>	46
4.4 Analisi sulla variabilità	47
Capitolo 5 – Analisi Dati Sperimentali e Verifiche	49
5.1 Conferma della teoria	49
5.1.1 <i>Umidità relativa</i>	50
5.1.2 <i>Addizione di olio</i>	52
5.2 Usura e sporramento	53
5.3 Rete in uscita	54
5.3.1 <i>Rete a 8 fori</i>	54
5.3.2 <i>Rete a 4 fori</i>	55
5.3.3 <i>Rete a 2 fori-fessure</i>	56
5.4 Regolazione di tensione di corrente	57
Capitolo 6 – Considerazioni Finali	59
Appendice A	61
Riepilogo prove a umidità controllata	
Appendice B	63
Dati Particle Size Distribution	
B.1 <i>Macina grigia, Miscela arabica</i>	63
B.2 <i>Macina grigia, Miscela robusta</i>	65
Bibliografia	67

Introduzione

La ditta CEADO s.r.l. ha in produzione un nuovo modello di macinacaffè che, a differenza dei comuni macinini che si possono trovare in molti bar, non ha una camera di accumulo della polvere che permette di regolare la dose al momento della preparazione della bevanda. Il caffè macinato ricade direttamente nel filtro: così facendo si evita la stagnazione della polvere e il rischio di irradimento, permettendo all'utente di preparare sempre un caffè nelle migliori condizioni.

In realtà, la preparazione del caffè con questo procedimento è lievemente macchinosa, per cui mal si adatta alla realtà degli esercizi ristorativi italiani, in cui nelle ore di punta si potrebbe avere una importante richiesta di espressi. Si può collocare invece nell'alta fascia qualitativa delle degustazioni di caffè o, al limite, per l'uso casalingo.

All'estero, dove la richiesta di espressi è sensibilmente minore, il macinacaffè può essere utilizzato nelle situazioni più varie, tenendo a mente che per diversi metodi di preparazione del caffè (espresso, americano, etc...), occorrono differenti finezze di macinazione.

Ceado ha richiesto uno studio sul comportamento della macchina, per analizzare al meglio il processo anche dal punto di vista triboelettrico, comprendere le variabili che entrano in gioco, ed, in fine, testare delle soluzioni pratiche per minimizzare la variabilità della polvere in uscita.

Dopo uno studio preliminare del processo ed una determinazione delle caratteristiche di scorrevolezza del caffè macinato, vengono effettuati dei test sulla variabilità della dose e proposto un metodo per la regolazione del macinacaffè. Analizzati i dati sperimentali, si procede con lo sviluppo di una teoria che deve essere confermata da ulteriori test, agendo sull'umidità relativa ambientale, la lubrificazione delle macchine e valutando le differenze tra le due miscele di caffè.

1. Cenni Introduttivi sul Caffè

1.1 Storia

Le prime testimonianze di coltivazione di caffè si hanno attorno al XII secolo nello Yemen, di lì a poco la bevanda ottenuta con chicchi di caffè macinati e tostati si diffuse in tutto il mondo islamico, fino a toccare l'Europa nel 1600. Moca era il centro principale per quanto riguarda il commercio del caffè.

Gli europei attorno al 1700 introdussero la pianta anche a Ceylon e Giava e successivamente in America Latina.

Nel 1860 il commercio di caffè mondiale contava circa 4 milioni di sacchi (un sacco equivale a 60 kg. Unità standard di scambio). Il caffè viene oggi prodotto in circa 60 paesi che si trovano principalmente in zone tropicali e sub tropicali (America Latina, Africa e Sud Est asiatico) e la produzione annua è intorno ai 127 milioni di sacchi, con un terzo della produzione concentrato in Brasile.

1.2 Biologia

Il genere *Coffea* appartiene alla famiglia delle *Rubiaceae* e comprende più di 100 specie diploidi (22 cromosomi), ad eccezione della *Coffea arabica*, allotetraploide (44 cromosomi).

La pianta del caffè è un arbusto sempreverde che può raggiungere l'altezza di 4-6 metri (*arabica*) fino a oltre 10 (*canephora*). Per la coltivazione si tende a non superare i 2 metri.

Hanno una ramificazione rigidamente dimorfica. La differenziazione dei fiori avviene alla fine del periodo delle piogge, vi sono poi varie fasi di sviluppo che portano alla maturazione del fiore.

Avvenuta l'impollinazione del fiore, si presenta un periodo di riposo con scarsa crescita di circa 8 settimane; i frutti aumentano poi di volume restando verdi per 8-10 settimane. Successivamente vi è la fase di riempimento del chicco per circa 12 settimane. Quindi, i

frutti maturano in circa 9 mesi dal periodo di fioritura; maturando passeranno dalla colorazione verde acceso a quella rossa o gialla a seconda della specie.

Nelle regioni equatoriali, con piovosità bimodale, gli stadi di sviluppo e maturazione si sovrappongono; nelle zone sopra e sotto l'equatore, a piovosità monomodale, si ha una sola fioritura e raccolto più breve.

Il frutto è una drupa, detta ciliegia, contenenti due semi avvolti in un pericarpo coriaceo e una pellicola mucillaginosa.

I semi (grani) sono pianoconvessi con un taglio longitudinale sulla faccia piana e sono avvolti in un tegumento (pellicola argentea).

1.3 Le varietà

L'arabica è qualitativamente molto migliore, ma molto più delicata, soprattutto alla ruggine della foglia (CLR), che nel tardo '800 praticamente estinse le coltivazioni di caffè in Asia.

Lo studio della genetica cerca di creare cultivar più resistenti, robuste e economicamente più profittabili. La selezione deve rispondere anche ad esigenze specifiche come il clima il suolo ed il metodo di raccolta.

Arabica

L'arabica è autoimpollinante ed è rinomata per la qualità in tazza.

La lotta alla CLR è iniziata intorno agli anni '20 in India ed ha avuto dei risultati positivi, fino alla comparsa di ceppi più aggressivi di *fungus*. Negli ultimi anni un ibrido detto F1, prodotto con retroimpollinazione e selezione del pedigree, ha dimostrato ottima resistenza alla CLR e alla malattia della ciliegia del caffè (CBR) mantenendo alti i livelli di qualità in tazza. La coltivazione richiede climi non troppo caldi (medie diurne intorno ai 20°C). Viene coltivata oltre i 1000 e fino ai 2000 metri nelle regioni equatoriali, e sotto i 1000 nelle zone sotto e sopra l'equatore (9-24° N e S). Una bassa temperatura in genere aumenta la qualità del caffè, ma temperature sottozero sono fatali per la pianta. Per una crescita ottimale occorre evitare lunghi periodi di caldo e siccità e avere una piovosità annua intorno ai 1500 mm.

Robusta

La specie *Coffea canephora* è ad impollinazione incrociata e le cultivar sono propagate per seme. Selezioni genetiche sono mirate ad aumentarne la resa e qualità.

La robusta richiede climi caldi e umidi, tropicali, con medie intorno ai 25°C e mai sotto i 10°C e piovosità di almeno 2000mm.

In generale il caffè richiede terreno profondo e drenante, fertile e leggermente acido (ph 5-6) con almeno il 2% di materiale organico.

1.4 Qualità del chicco

La qualità del chicco verde dipende principalmente dall'ambiente, dalla varietà coltivata, dalle pratiche colturali e dalla lavorazione dopo il raccolto. Da i primi tre fattori dipende la qualità potenziale che può esser peggiorata dalla lavorazione. La lavorazione può avvenire ad umido, semiumido o a secco. Le ultime due creano una bevanda con più corpo e meno acidula.

1.4.1 Ambiente

Come già visto altitudine e latitudine sono caratteristiche per ogni coltivazione. Precipitazioni in eccesso portano ad una scarsa qualità di caffè, dovuta alla maturazione irregolare, ne conseguono flavour sgradevoli, ammuffiti e pungenti(*rioy*). Stagioni particolarmente secche causano note astringenti ed immature.

1.4.2 Varietà, aspetti genetici

Non è facile confrontare tra loro cultivar diverse di caffè prodotte in zone differenti. Nella pratica ci si rifà ad uno standard di coltivazioni standard (bourbon, kent) e valutata in base a caratteristiche come aroma, gusto, flavour e corpo. Dati da test analitici sulla composizione chimica di grani verdi sono difficilmente correlabili con la qualità in tazza.

Tabella 1.1: Composizione chimica delle differenti qualità di caffè.

Composto	Arabica (%)	Robusta (%)
Caffeina	1,2	2,4 (>4)
Trigonellina	1	0,7
amminoacidi	0,5	0,8
Acidi clorogenici	7,1	10,3
Lipidi totali	16	10
Acido oleico	6,7-8,2	9,7-14,2
cafestolo	0,5-0,9	0,2
caveolo	0,3	-
16-0-metilcafestolo	-	0,07-0,15
minerali	4,2	4,4
potassio	1,7	1,8
Carboidrati (per differenza)	58,9	60

Fonte: Illy & Viani, 1995; Speer & Kolling-Speer, 2001.

L'arabica contiene in genere minor caffeina, ma molti più oli totali.

Gli acidi clorogenici, più presenti nella robusta, contribuiscono alle note astringenti: questo ha effetto positivo sulla qualità dell'arabica.

I grassi sono responsabili dell'intrappolamento di molecole volatili caratteristiche dell'aroma, ma non è ancora molto chiaro come la composizione relativa delle frazioni lipidiche influenzi la qualità in tazza. I principali lipidi nel caffè includono l'acido linoleico (C18:1, 47%), palmitico (C16:0, 41%), oleico (C18:2, 6,4%) e stearico (C18:0, 6%).

Sono poi molto diversi i contenuti di sostanze volatili, ma non sono state correlate con certezza a particolarità della bevanda.

I minerali sono circa il 4% di cui quasi la metà è costituito dal potassio. Sono poi presenti magnesio e fosfati. Il caffè è l'alimento con il più alto contenuto di rubidio (fino a 180 mg/kg di materia secca).

Il contenuto di acidi (clorogenici, chinico e malico) produce il gusto acidulo ed è molto fluttuante tra specie ma anche tra annate.

I carboidrati rappresentano circa il 60% della base secca.

Tabella 1.2: *Principali zuccheri contenuti nel caffè.*

Componente	Arabica (%)	Robusta (%)
monosaccaridi	0,2-0,5	0,2-0,5
saccarosio	6-9	3-7
polisaccaridi	43-45	46,9-48,3
mannosio	21,3-22,5	21,7-22,4
galattosio	10,4-11,9	12,4-14
altri	7-10	5-7

La presenza di zuccheri riducenti, più presenti nella robusta, contribuisce all'amarezza per caramellizzazione durante la tostatura dei grani.

In generale, il profilo aromatico dipende dal genotipo, dall'ambiente e dalla tostatura. Si sta cercando, con strumentazione sempre più sofisticata, di differenziare specifiche qualità per ogni ambiente, in modo da mantenere fermo il profilo dei composti volatili e contribuire quindi alla definizione di standard di miscela.

1.4.3 Pratiche colturali

Occorre un buon bilanciamento tra nutrienti e fertilizzanti per la produzione di grani di qualità. Elementi essenziali sono il potassio nitrato, il calcio, lo zinco e il boro.

Il potassio ha ruolo nella formazione degli zuccheri nella fase di riempimento del chicco. L'azoto contribuisce alla formazione di amminoacidi e ha effetti sulla percentuale di caffeina.

Il calcio concorre alla formazione della parete e rende la pianta più resistente all'attacco di parassiti. Lo zinco influenza il metabolismo delle proteine ed il boro ha effetti sulla fioritura, quindi sulla resa della pianta.

Il chicco deve essere protetto da parassiti e infezioni micotiche che causano una maturazione anomala e una fermentazione precoce, con conseguenze disastrose sulla qualità.

1.5 Lavorazione

1.5.1 Raccolto

Il raccolto si incomincia quando almeno il 95% delle ciliegie sono giunte a maturazione. I grani non maturi inficiano la qualità del caffè, dopo la tostatura assumono un colore nero/verde e sono facilmente separabili in quanto più leggeri.

Il raccolto può essere effettuato in tre maniere differenti:

Strappo (stripping): le ciliegie vengono strappate tutte assieme dalla pianta. Occorre quindi una opportuna valutazione del momento in cui cominciare la raccolta. Si cerca di avere una maturazione più omogenea possibile e di avere una bassa percentuale di ciliegie verdi o mature che in fase di essiccamento potrebbero portare a fermentazioni. I frutti vengono posti su dei teloni a terra in modo da evitare il contaminamento con altri già caduti spontaneamente. Le drupe vengono poi vagliate e trasportate alla fase di lavorazione.

Selezione manuale (picking): le ciliegie vengono selezionate e raccolte quando mature in sacchi e quindi subito lavorate per evitare maturazioni. Questo metodo viene preferito in zone con piovosità costante, in cui si hanno molte fioriture. Vengono effettuate molte raccolte in breve tempo e necessita di adeguata forza lavoro.

Raccolta meccanica: con un'apposito macchinario le piante vengono scosse al fine di far cadere i frutti. Esistono macchine semoventi che raccolgono e vagliano le ciliegie, altre che strappano i grani per posarli a terra o su teloni, trainate da trattori o dal raccoglitore. La morfologia del terreno deve essere adeguata per l'utilizzo di macchine. Per migliorare la resa vengono fatte più raccolte concentrandosi ogni volta sulla parte di pianta con ciliegie a giusta maturazione. La raccolta meccanica permette di abbattere i costi operativi che pesano molto sul costo totale di produzione.

La raccolta manuale non è sinonimo assoluto di qualità: opportune tecniche di selezione dei chicchi in fase di pre-lavorazione permettono di avere una resa qualitativa alta contenendo i costi.

1.5.2 Lavorazione del prodotto raccolto

La lavorazione deve cominciare il giorno stesso della raccolta, per evitare fermentazioni e contaminazione da muffe.

Vengono separate sporcizia ed impurità dalle ciliegie, che vengono successivamente lavate e separate per densità: i leggeri (ciliegie secche o troppo mature) e i pesanti (ciliegie mature). Vengono poi separate per livello di umidità per facilitare la fase di essiccazione.

Le lavorazioni possono essere:

a secco (naturale): dopo la raccolta i frutti interi vengono essiccati al sole o meccanicamente. Questo metodo permette di ottenere un buon caffè come corpo e aroma.

A lavaggio (umido): vengono selezionate solo le ciliegie abbastanza mature e vengono spolpate della mucillagine (meccanicamente o per fermentazione). Sono poi lavati per rimuovere le ultime tracce di polpa.

Naturale spolpato: le drupe vengono selezionate spolpate ed essiccate con il pergamino. Il costo e la qualità sono intermedie tra le altre due tecniche.

L'acqua utilizzata e i resti solidi devono essere smaltiti adeguatamente per evitare danni all'ambiente. Il processo naturale è praticamente sostenibile: l'acqua serve solo per separare i frutti, che non rilasciano niente nel fluido. Il metodo naturale spolpato produce sostanza organica che può essere utilizzata come fertilizzante. Il metodo a umido, soprattutto se comprende una fermentazione in acqua, produce grossi volumi di acqua inquinata con sostanze organiche.

I chicchi lavorati a umido perdono in media un 1% di solidi solubili, ma sono facilitati nel processo di essiccazione.

1.5.3 Essiccazione

L'umidità nelle ciliegie è intorno al 60% per quelle mature e tende a scendere con l'invecchiamento. L'eliminazione dell'acqua è un processo lento per cui per avere una resa adeguata occorre avere una massa di caffè uniforme ed un tempo di essiccazione lungo. Il processo può avvenire per esposizione al sole, con essiccatoi meccanici o una

combinazione dei due e porta ad umidità intorno al 25% esposizione al sole: i grani vengono selezionati in base al punto di maturazione e vengono sparsi per più giorni in strati sottili su grandi aie, leggermente in pendenza per favorire il deflusso dell'acqua. Ogni ora circa vengono rigirati in modo da rendere più uniforme possibile l'esposizione alla luce ed espellere l'acqua che può causare fermentazioni. I caffè spolpati vengono riposti suripiani sospesi e la fase di essiccazione si completa anche in un solo giorno.

Essiccazione meccanica: si utilizza quando il clima è avverso e spesso per spingere l'umidità al 10% circa. Il calore è trasmesso attraverso radiatori per evitare il contatto col fumo. La temperatura non deve superare i 50°C per evitare la formazione di flavour sgradevoli e la morte dell'embrione nel grano. Per rendere più *green* il processo, come combustibile vengono usati anche buccie e pergamino del caffè.

Il caffè ora viene sbucciato, se necessario, pulito, lucidato e separato per forma, colore e dimensione, in modo da avere un prodotto finale più omogeneo possibile.

La crivellatura seleziona per dimensione i chicchi con una serie tradizionalmente in base ad 1/64 di pollice. I grani tondi *peaberry* provenienti da ciliegie con un solo seme non passano attraverso fori appositamente oblungi.

Grani difettosi, danneggiati o fermentati, quindi più leggeri, vengono separati per gravità. Dei ventilatori posti sotto un ripiano fanno galleggiare i grani leggeri e i pesanti si separano cadendo per vibrazione.

La selezione per colore viene eseguita manualmente da operatori, dove la mano d'opera ha un costo affrontabile. Per migliorare la qualità generale ed automatizzare il processo, sono stati introdotti dei macchinari per la selezione elettronica che sfruttano la riflettanza di particolari lunghezze d'onda, IR e fluorescenza UV.

Terminata questa fase di lavorazione, i grani possono essere stoccati in ambienti ad umidità e temperatura controllati e a richiesta trasportati alle torrefazioni per la fase di tostatura e macinazione.

1.6 Tostatura

Il chicco ha una forma non regolare e una struttura interna eterogenea. Sottoposto a riscaldamento si ha l'evaporazione dell'acqua residua che porta ad una variazione di volume fino alla critica rottura del grano. La distribuzione di temperatura non è mai uniforme è difficilmente controllabile, il ΔT tra superficie e interno raggiunge normalmente i 70°C.

La fase di tostatura-brunitura avviene attorno ai 160°C con produzione di composti gassosi, anidride carbonica in particolare, che tenderanno ad uscire dal grano. Per avere un giusto distacco tra fase di evaporazione e tostatura occorre un severo controllo del ciclo di riscaldamento ed evitare forti gradienti termici sui chicchi: si otterrà così una tostatura qualitativamente omogenea ed una generazione di aromi ottimale.

Si applica un processo a stadi con lento aumento di temperatura del gas riscaldante per tempo intorno ai 2 minuti. Vi deve essere un aumento della pressione interna del chicco, sintomo dello sviluppo di sostanza aromatiche.

Esistono anche cicli di tostatura a 400°C con convezione forzata e tempi di poco superiori al minuto, ma i forti gradienti termici nel chicco producono un prodotto qualitativamente scarso: una bevanda astringente per la forte presenza di acidi clorogenici.

A tostatura ultimata, i grani vengono raffreddati velocemente con acqua o aria, per evitare ulteriori cambiamenti odori o colorazioni. La resa del processo può essere misurata con la perdita di massa secca o la perdita di massa totale.

Tabella 1.3: Differenze principali tra caffè verde e caffè tostato.

Tipo caffè	Massa (g)	Umidità (%)	Perdita tostatura	Perdita organica	Densità (g/ml)	Volume (ml)	Raggio 4,3 (mm)
verde	0,15	10-12	0	0	1,2-1,4	0,12	3
Tostato scuro	0,13	2-3	15-18	5-8	0,7-0,8	0,18	3,5

I forni tipici possono essere a letto fisso, letto fluido o tamburo rotante. I cicli continui o batch.

1.6.1 Effetti tostatura

Il caffè verde ha dei sentori di peperone verde/pisello.

Il caffè tostato assume una colorazione dal marrone al nero ed una struttura friabile con aumento della porosità. Il volume può arrivare anche a raddoppiare (tostatura scura), dimezzando la densità. L'olio si sposta in superficie, rendendo lucido il chicco.

Il pH aumenta leggermente fino a poco sopra il valore di 5. Gli zuccheri semplici vengono idrolizzati. Il vapore e l'anidride carbonica sono prodotti delle reazioni di Maillard, responsabili anche del cambiamento di colore (melanoidine) e dello sviluppo dell'aroma.

La reazione di Maillard parte da carboidrati complessi, acidi clorogenici e amminoacidi liberi, è favorita rispetto alla caramellizzazione per la bassa energia di attivazione e la presenza di composti azotati. Anche gli acidi organici subiscono questa reazione, portando alla formazione di acidi semplici (formico ed acetico), oppure possono esterificare.

La frazione lipidica viene lievissimamente decomposta e aumenta il livello di acidi grassi trans.

Le proteine vengono degradate, con una perdita di azoto amminico fino al 50%; la tendenza a fare schiuma nel caffè dipende dalla quantità di proteine che vengono estratte.

Il contenuto di minerali resta inalterato, come la caffeina. La trigonellina (alcaloide) viene decomposta (fino al 50%) producendo anche acido nicotinico: il rapporto tra trigonellina/acido nicotinico viene utilizzato per stimare il grado di tostatura del caffè.

Le caratteristiche aromatiche, come visto, vengono prodotte dalle reazioni di Maillard con:

- reazioni dei carboidrati e proteine che portano aldeidi e acidi volatili;
- produzione di fenoli dagli acidi clorogenici (tipici della robusta);
- degradazione della trigonellina.

I prodotti volatili aromatici della tostatura sono oltre 1000 e non tutti chiaramente identificati.

1.7 Macinazione

La macinazione è il processo in cui, attraverso una macchina detta macchino, si rompono i chicchi di caffè per poi estrarne con acque le sostanze solubili ed ottenere la bevanda.

La polverizzazione dei grani causa l'aumento della superficie specifica delle particelle migliorando l'estrazione. Per ottenere una bevanda ottimale occorre avere un tempo di percolazione breve ed allo stesso tempo una resa estrattiva alta; a questo scopo è studiata una distribuzione bimodale delle dimensioni delle particelle: i fini contribuiscono alla buona estrazione e le particelle più grossolane garantiscono il deflusso dell'acqua.

1.7.1 Teoria

Lo sforzo applicato ad una particella può essere di taglio o di compressione, le deformazioni che ne seguiranno potranno essere di tipo elastico hookiano, viscoso o intermedio (visco-elastico). Si pensa che il processo di macinazione crea o propaga fratture del chicco quando lo sforzo supera il carico di rottura. I grani non sono assimilabili a solidi ideali: sono formati da uno strato di tessuto ripiegato inframezzato da uno strato sottile (pellicola argentea); microscopicamente, sono presenti delle cellule di diverse dimensioni più o meno piene di composti organici a seconda del grado di tostatura. Si ha quindi una geometria non regolare e delle discontinuità interne, dove si concentrano gli sforzi e avvengono le fratture.

Nel caso di sforzi di taglio, i punti critici si trovano lungo un piano di taglio che divide in due sezioni la particella. Gli sforzi di compressione la distribuzione delle forze è più uniforme e si possono verificare più linee di frattura con formazione di frammenti di dimensioni casuali.

Degli studi geometri di simulazione del processo al computer (Petracco & Marega, 1991, *Coffee Grinding Dynamics: a new approach by computer simulation Proc. 14th ASIC Coll.* pp 319-330), sfruttando il metodo degli elementi finiti, hanno dimostrato come gli sforzi di taglio producano molte particelle fini e poche particelle grossolane.

Nella progettazione dei macchini è quindi necessario prima portare i frammenti ad una

dimensione di circa un millimetro (triturazione) e successivamente applicare shear per ottenere la PSD ricercata.

1.7.2 I macinini

L'elevata solubilità del caffè impedisce l'uso di macchinari ad umido, che permettono solitamente di regolare bene la distribuzione delle dimensioni. Si devono quindi utilizzare macchine a secco, che lavorano o per frizione o per impatto.

La macinazione a impatto è effettuata da una serie di lame che ruotano ed applicano un impulso d'urto alle particelle. Tale tecnica è utilizzata solo nei macinacaffè casalinghi di piccola taglia, poiché la polvere rimane tra le lame e subisce ulteriore lavorazione. La regolazione della misura non è semplice e dipende anche dalla durata dell'operazione.

La macinazione a frizione si basa sul passaggio dei chicchi in uno spazio tra due organi in movimento detti macine. La geometria delle macine è tale da creare una graduale riduzione della luce tra le superfici che applicano una coppia di forze alle particelle. A seconda della forma, le forze possono essere di taglio o di compressione.

I tipi più comuni di macine nell'industria sono:

1. macine cilindriche: una coppia di cilindri rigati con assi paralleli che ruotano in senso opposto. Sono posizionati in modo da quasi toccarsi. I chicchi vengono introdotti con caduta programmata per non ostruire lo spazio di passaggio. Sono utilizzati a livello industriale;
2. macine coniche: un ingranaggio conico lavorato in superficie ruota all'interno di una cavità tronco-conica. L'entrata dei chicchi è a rifiuto, per gravità. Hanno un ottimo rapporto di produttività/dimensioni;
3. macine piane: una coppia di dischi con una cavità tronco-conica, sovrapposto in modo che le loro basi quasi si tocchino. Solitamente quello inferiore ruota attorno al suo asse mentre quello superiore è bloccato. L'alimentazione dall'alto è per gravità o forzata con vite senza fine. La polvere macinata esce per forza centrifuga, radialmente alle lame.

Per soddisfare il bisogno di avere due fasi di macinazione, uno di premacinazione che frantuma i chicchi ed una di finitura dei frammenti alla grandezza ricercate, si sfruttano

due tecniche. A livello professionale, le superfici delle lame vengono lavorate al fine di ottenere delle serie di dentini diseguali: creando spazi di diverse dimensioni, le mole possono trattare sia chicchi interi che i loro frammenti. A livello industriale si montano una serie di macine dimensionate per ottenere una specifica dimensione media. Chiaramente, configurazioni complesse aumentano il costo del macchinario e rendono più difficile il controllo della stabilità. Nella pratica industriale quindi si utilizzano o una serie di 3-4 cilindri per produzioni importanti di caffè (tonnellate/hr), oppure un sistema con uno stadio di premacinazione con macine coniche seguito da macine piane per flussi medio-piccoli (qualche centinaio di kg di caffè/ora). La polvere ottenuta verrà poi miscelata ed omogeneizzata con unità rotanti o viti senza fine; in fine il prodotto viene trasportato alla fase di confezionamento, talvolta in atmosfera inerte.

1.7.3 Effetti macinazione

Come già detto, l'effetto desiderato durante la macinazione è quello della frammentazione dei chicchi. La sua efficacia tradizionalmente si valuta empiricamente sfregando della polvere tra le dita, ma sarebbe più opportuno applicare delle tecniche analitiche che si vedranno in seguito.

Nei macinini è comune misurare temperature attorno agli 80°C, che probabilmente corrispondono a temperature nell'ordine dei 100°C. Nonostante siano temperature ben lontane da quelle della tostatura, possono comunque attivare reazioni di Maillard che peggiorano le qualità organolettiche del caffè. Temperature alte durante la frantumazione dei chicchi facilitano il rilascio delle sostanze volatili aromatiche, le cellule che non si frantumano (indicativamente diametri maggiori di 50 µm) mantengono al loro interno i gas che concorreranno alla formazione della schiuma in tazza.

La rottura dei chicchi inoltre facilita la traspirazione degli oli verso la superficie della polvere. I grassi contenuti sono molto viscosi a temperatura ambiente (70 mPa s) ma già a 40°C cominciano ad essere fluidi (25 mPa s). Alle temperature tipiche della macinazione scorrono facilmente tra le microfessure e ricoprono le particelle, per poi tornare allo stato semi-solido viscoso. Si modificano così le proprietà coesive della polvere, che avranno ripercussioni nella fase di percolazione, aumentando la resistenza idraulica.

1.7.4 Metodi di misurazione della granulometria

Per valutare la finezza della polvere, i baristi che si macinano in loco i grani, preparano una singola porzione di caffè e valutano la quantità di liquido percolato in un dato tempo. Questa misura viene usata per regolare la tacca sul macinino per regolare la luce tra le macine. E' un metodo diretto ed empirico abbastanza affidabile ma che non tiene in considerazione molte altre variabili (umidità, compressione del pannello, regolazioni della macchina espresso, etc..). Occorre quindi avere dei metodi analitici più sicuri, oltre che la valutazione tattile della polvere.

Il metodo di setacciatura con vibrovagli è il più intuitivo. Viene montata una serie di setacci a maglie via via più strette, si raccoglie e si pesa la polvere raccolta di ogni frazione. Con questi dati si possono costruire grafici logaritmici e lineari che danno idea dalla Particle Size Distribution. Nel caso della polvere di caffè, il metodo non è molto efficiente in quanto per avere una separazione adeguata occorrono molti setacci, anche di dimensioni particolarmente piccole (minori di 10 μm). Inoltre, gli oli creano agglomerati che distorcono sensibilmente i risultati.

Il metodo di Imaging consiste nel sistemare un campione di polvere su di un vetrino su cui è tracciato un reticolo e determinare direttamente la dimensione delle particelle. E' un metodo molto laborioso ma che oggi è automatizzato grazie alla microscopia fotografica ed all'analisi d'immagine. Come le altre tecniche di microdeterminazione, ci sono dei problemi intrinseci legati alla rappresentatività del campione a cui si aggiungono le difficoltà di creare uno strato sottili di particelle per permettere un conteggio efficace.

La diffrattometria laser si adatta bene alle esigenze dell'industria: è veloce e ha un range tra i 5 e i 2000 μm . Luci laser visibili o nel vicino infrarosso vengono puntate su un campione estremamente piccolo circondato da sensori anulari concentrici. Le particelle diffrangono la luce secondo una geometria conica: più piccole sono le particelle, più grande è l'angolo del cono di diffrazione. I dati raccolti vengono elaborati per costruire dei grafici: possono essere differenziali o cumulativi e ottenuti in base numerale, volumetrica, massica, etc.

1.7.5 Variabili della macinazione

Prima fra tutte occorre considerare la variabilità della miscela. Il caffè che normalmente si utilizza non viene mai da una unica coltivazione, ma ogni torrefazione mescola chicchi da più paesi e di più varietà per costruire una sua miscela caratteristica. Per cui, la macinazione ha a che fare con grani di diversa composizione e durezza, caratteristiche che possono variare nel tempo, essendo il caffè un prodotto di agricoltura che dipende da leggi del clima.

Il grado di tostatura e la conseguente quantità di gas intrappolati può influenzare la stabilità della macinazione, di fatti spesso il caffè viene degasato a riposo in un silos.

Chicchi raffreddati ad acqua hanno caratteristiche molto differenti di quelli raffreddati ad aria: i secondi hanno una minore umidità residua, mentre i primi sono più tenaci; questo implica che occorre applicare più energia per frantumarli, quindi si rischia di raggiungere temperature più elevate durante il processo. Inoltre, durante il raffreddamento ad acqua, per l'elevato sbalzo termico le pareti cellulari si contraggono rapidamente, rompendosi e liberando parte dei gas intrappolati.

Per quanto riguarda il macinino, la distanza tra le macine regola le dimensioni delle polveri. E' necessario che la meccanica sia alquanto precisa e non deve presentare isteresi. Vi sono poi dei parametri tipici di ogni macchina, legati al meccanismo di alimentazione e all'eventuale pre-triturazione. Una buona pre-triturazione evita surriscaldamenti ed aumenta la resa del processo. Agire sulla velocità di rotazione, oltre che essere costoso da realizzare, sembra essere una scelta abbastanza efficiente. Altri disturbi entranti nel processo possono essere di varia natura e non facilmente interpretabili. L'attrito durante la frantumazione crea dispersione di energia meccanica e sviluppo di calore che causa una dilatazione differenziale degli organi rotanti. In pratica industriale è comune riciclare o rigettare il macinato ottenuto prima che il macchinario non abbia raggiunto la stabilità termica.

L'usura certamente incide sulla resa qualitativa: lame non adeguatamente affilate aumentano il rapporto compression/taglio, si creano hot spot che danno un cattivo aroma al caffè. Oltre a questo c'è sempre da tener in considerazione eventi straordinari come malfunzionamenti nell'alimentazione elettrica, l'ingresso di materiale estraneo o l'ostruzione dei condotti di entrata o uscita.

1.8 Percolazione

Terminato il processo produttivo, il caffè viene confezionato, immagazzinato e venduto al dettaglio.

I processi sfruttati negli esercizi commerciali per ottenere una bevanda dalla polvere di caffè sono principalmente 3 e tutti si basano sull'estrazione mediante acqua calda dei composti contenuti.

Il più semplice è il caffè ottenuto per infusione: la polvere viene versata in un recipiente contenente acqua bollente. Noto come caffè arabo, richiede una PSD molto spostata verso i fini per migliorare la resa estrattiva e non limitare la sensazione al palato dei granuli.

Ponendo la polvere su un filtro e lasciando passare l'acqua calda si ottiene il caffè filtro, noto anche come caffè americano: si può regolare la quantità di liquido versato per avere una bevanda più o meno concentrata. E' la tipologia più diffusa.

L'espresso, invece, richiede una macchina espresso che sia composta da un filtro che contiene un pannello di polvere di caffè, che verrà attraversato da acqua calda a 90°C in pressione, generata da una caldaia. L'acqua viene addolcita per evitare depositi in caldaia

Il caffè con la moka casalingo si basa sullo stesso processo, ma lavora a pressioni più modeste (inferiori ai 2bar): questo porta all'estrazione di sostanze che conferiscono un gusto amaro.

1.8.1 Processo estrattivo

Il caffè viene deposto in un filtro e pressato, compattato, assumendo la conformazione di un letto di particelle. L'acqua in pressione si muove negli interstizi tra le particelle (grado di vuoto).

$$P_e = P_r + P_c + P_a.$$

La pressione dell'acqua P_e deve essere almeno pari alla somma della pressione atmosferica P_a delle perdite di carico cinetiche P_c e di resistenza del letto P_r . La pressione dell'acqua negli esercizi è mantenuta intorno alle 10 atmosfere, pressione generata da una pompa all'interno della macchina espresso. Il filtro spesso si lascia attraversare anche da particelle

submicroniche e gocce di olio che conferiscono aromaticità alla bevanda.

Il liquido a contatto con la polvere estrae le sostanze solubili e porta in emulsione gli oli e si separa dalla fase solida grazie al filtro. Il processo è favorito da particelle piccole, quindi ad alta superficie specifica: per valutarne l'efficacia si ricorre alla resa estrattiva, corrispondente alla massa estratta su massa di caffè alimentata nel filtro. In media si attesta sul 20-30%.

La legge di estrazione è:

$$s = k \frac{TA(C-c)t}{nx}$$

Con:

s = quantità di soluto estratto;

k = costante, dipende da fattori molecolari;

T = Temperatura assoluta;

A = area particella;

C = concentrazione soluti nel solido;

c = concentrazione soluti nel liquido;

t = tempo di contatto;

n = viscosità del liquido;

x = profondità strato.

Il tempo di contatto è solitamente abbastanza basso (intorno ai 25 secondi) da non permettere l'equilibrio tra le due fasi e la diffusione all'interno delle particelle, anche per la mai confermata presenza di porosità o canali sulle pareti cellulari. Questo sfavorisce l'estrazione di composti poco solubili, spesso dal sapore non ottimale (amaro ed astringente), vengono invece prima estratte le sostanze solubili (acide e dolci). Se la regolazione di tutti i parametri non è ottimale si rischia di ottenere una bevanda leggera (sottoestratta) o troppo amara (alta resa estrattiva ma gusto non ottimale).

La fase lipidica viene portata in emulsione, con rese tra il 10 e il 15%. Le gocce in emulsione hanno una dimensione massima di 10 μ m e non tendono a non coalescere. Questa fase è responsabile della famosa schiuma bruna presente sulla superficie del caffè.

1.8.2 Parametri della percolazione

Come visto, i parametri che incidono sulla bontà di un espresso sono molteplici e non sempre ben chiari. Si parte dalla qualità intrinseca del caffè e della sua lavorazione (es: robusta ha più resa estrattiva, tostati scuri contengono più sostanze solubili, etc..), alle proprietà del pannello (peso, PSD, ϵ), l'acqua, e le caratteristiche della macchina espresso (T, P, t percolazione).

La dose di caffè ideale è attestata attorno ai 6 grammi. Oltre, si rischia di avere un pannello poco permeabile. Negli esercizi commerciali la dose è misurata da volumetricamente con un dosatore.

La porosità del pannello dipende, oltre che dalle dimensioni delle particelle, dal grado di pressione che si applica per compattarlo. L'esperienza ha dimostrato che la differenza di pressione applicata non ha praticamente effetti sulla qualità della tazza; al contrario, i risultati sono molto diversi con una miscela pressata debolmente.

2. Strumentazione e Materiali

Si presenta il macinino a macine piane, i vari set di lame testati e si introduce la caratterizzazione della polvere.

2.1 Macinino



Illustrazione 2.1: Macinacaffè Ceado.

La macchina presa in esame è un macinacaffè della ditta CEADO Srl. E' composto da un corpo unico in lega di alluminio contenente un motorino elettrico sincrono a 220V, a cui è collegato un albero che trasmette il movimento alle macine. Le macine sono delle corone circolari lavorate al tornio e successivamente rettificate, per minimizzare le imperfezioni dovute alla lavorazione meccanica. Sulle mole sono intagliati denti di due dimensioni differenti in modo da simulare una macinazione in due stadi. La macina superiore è fissata

su di una piastra fissa smontabile, con un meccanismo che permette la regolazione della luce tra le macine (valore su una scala graduata tra 0 e 10); l'altra è montata su un disco collegato all'albero, quindi ruota attorno al suo asse.

Il caffè in chicchi è accumulato in una tramoggia di materiale plastico removibile, con un otturatore circolare manuale. Il caffè cade al centro della macina superiore e si trova così nello spazio tra le due macine: la forza centrifuga spinge i chicchi verso l'esterno, che incontrano così le lame e vengono frantumati. La polvere esce tangenzialmente attraverso lo spazio tra le due macine e si accumula in una piccola camera circolare, ricavata tra il corpo fisso e le macine stesse. Solidali al disco collegato all'albero vi sono 3 setti che hanno il compito di spingere all'esterno la polvere di caffè: ruotando spingono la polvere fino ad un foro rettangolare ricavato sulla parete frontale della camera di accumulo; al foro è raccordato uno scivolo di alluminio che incanala il flusso di materiale granulare verso l'esterno. Qui, tipicamente, alla fine dello scivolo si posiziona il filtro dove si accumula la polvere, che verrà poi compattata e utilizzata per la preparazione del caffè in tazza.

Il motore elettrico viene azionato con un tasto posto appena sotto lo scivolo (questo permette di azionare la macchina direttamente col filtro, in una posizione ideale per la raccolta del caffè macinato).

La dose ideale per un caffè di qualità è intorno ai 7 grammi di polvere; la dose doppia per ottenere due tazzine è leggermente inferiore (circa 13 grammi) per dinamiche legate all'estrazione delle sostanze durante la percolazione dell'acqua attraverso il cake di caffè.

Un dispositivo elettronico ed una semplice interfaccia permettono di scegliere se macinare caffè per una o due dosi, regolare il tempo di macinazione con intervalli di un decimo di secondo, entrare in modalità manuale (il motore gira fin tanto che il tasto resta premuto) ed infine settare la lingua dell'interfaccia.

Il sistema registra le dosi di caffè macinate: attraverso un sistema approssimativo la macchina segnala all'utente un'eccessiva usuare delle lame.

Sono stati forniti set di macine di diversi materiali per uno studio sulla produttività.

2.1.1 Macine in acciaio

La geometria è stata descritta in capitoli precedenti, le mole prese qui in esame differiscono principalmente per il materiale e i trattamenti superficiali.



Illustrazione 2.2: Da in alto a sinistra, in senso orario: macina grigia montata in fabbrica, macina oro, macina viola e macina rossa.

Tabella 2.1: Dati tecnici delle macine utilizzate.

Nome	Materiale	Trattamento	Note
grigia			
oro			
rossa			
viola			

2.1.3 Macine in ceramica

Sono poi state prese in esame due macine in ceramica: la prima identica alle precedenti, mentre la seconda presenta dei denti più inclinati.



Illustrazione 2.3: Macine in ceramica: a sinistra quella High Performances a destra quella standard.



Illustrazione 2.4: Particolare delle diverse inclinazioni dei denti delle due macine.

I denti più inclinati creano una alta velocità tangenziale del materiale in uscita, permettendo una portata maggiore (un fenomeno simile è quello del Triangolo delle Velocità per le pompe centrifughe).

2.2 Caratterizzazione polveri

Per conoscere meglio le proprietà delle polveri che vengono prodotte si ricorre alla *Particle Size Distribution*, la densità apparente e l'angolo interno di frizione come indicatori di coesività.

2.2.1 PSD

Per conoscere la distribuzioni delle dimensioni delle particelle occorre essere in grado di separare la polvere in frazioni di dimensioni note. Si è tentato con dei vagli ma la presenza di molte particelle fini (inferioi a $10\mu\text{m}$) che formano agglomerati falsa la misura. Inoltre, non erano disponibili setacci a sufficienze e con fori abbastanza stretti per ottenere una distribuzione affidabile.

Si è ricorsi quindi alla diffrattometria laser, con l'utilizzo del macchinario Malvern 2000 presente al Dipartimento di Farmacia dell'Università di Padova.

Si è raccolto un campione di caffè alle tacche 0, 5 e 10. La polvere viene dispersa in olio siliconico e introdotta nella cella di analisi. Lo strumento, collegato ad un terminale, restituisce la frazione di particelle per ogni intervallo predefinito di dimensioni e calcola alcuni diametri equivalenti, supposte le particelle come sferiche.

Si nota chiaramente la distribuzione bimodale con due picchi, uno nelle frazioni molto fini (intorno ai $50\mu\text{m}$) e l'altro tra i 400 e $600\mu\text{m}$. Risalta subito il fatto che, come supposto, il materiale ottenuto con la luce massima tra le macine ha una frazione di particelle grandi molto accentuata, anche ampiamente oltre il millimetro, dove gli altri due campioni faticano ad arrivare.

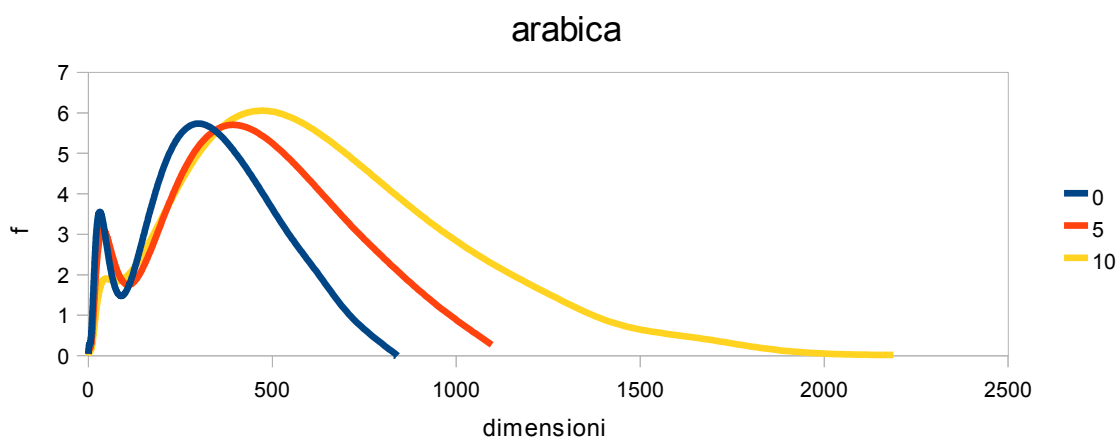


Illustrazione 2.5: PSD miscela arabica macina grigia

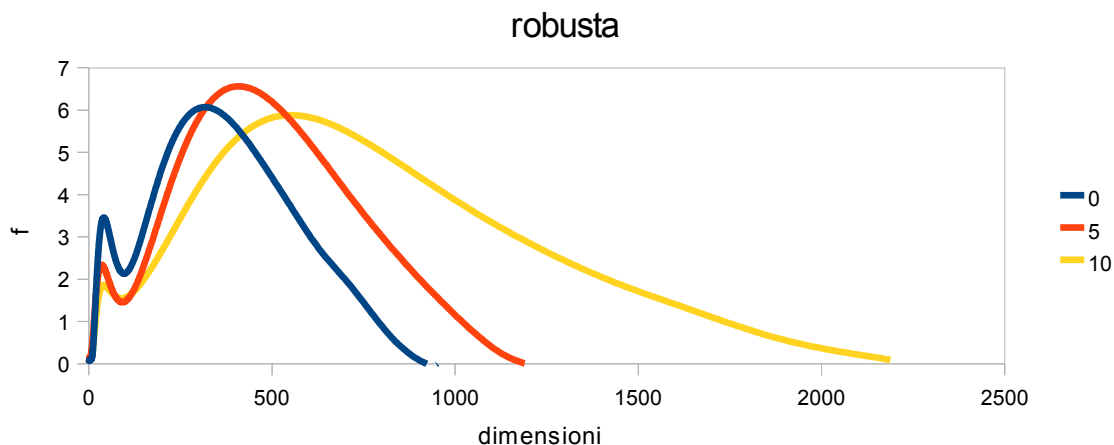


Illustrazione 2.6: PSD miscela robusta macina grigia al variare della luce tra macine.

Tabella 2.2: Diametri equivalenti calcolati con Malvern 2000.

Miscela	l	D[3,2]	D [4,3]
Arabica	0	30,356	146,161
	5	34,581	238,701
	10	69,978	353,411
Robusta	0	43,512	203,855
	5	42,303	274,285
	10	66,457	417,573

Il D [3,2] è il diametro ricavato dall'ipotetica sfera a superficie specifica uguale a quella della particella media; nel D [4,3] il diametro equivalente è ottenuto equiparando i volumi

di sfera e particella.

In linea generale, dalla macinazione della qualità robusta si ottiene un materiale leggermente più grossolano.

Occorre precisare che questi risultati non sono poi così solidi: data la distribuzione bimodale, forse sarebbe più corretto ricavare due diametri equivalenti, uno per i fini ed uno per i grossi. Inoltre, paragonare le particelle a delle sfere è un'approssimazione forzata.

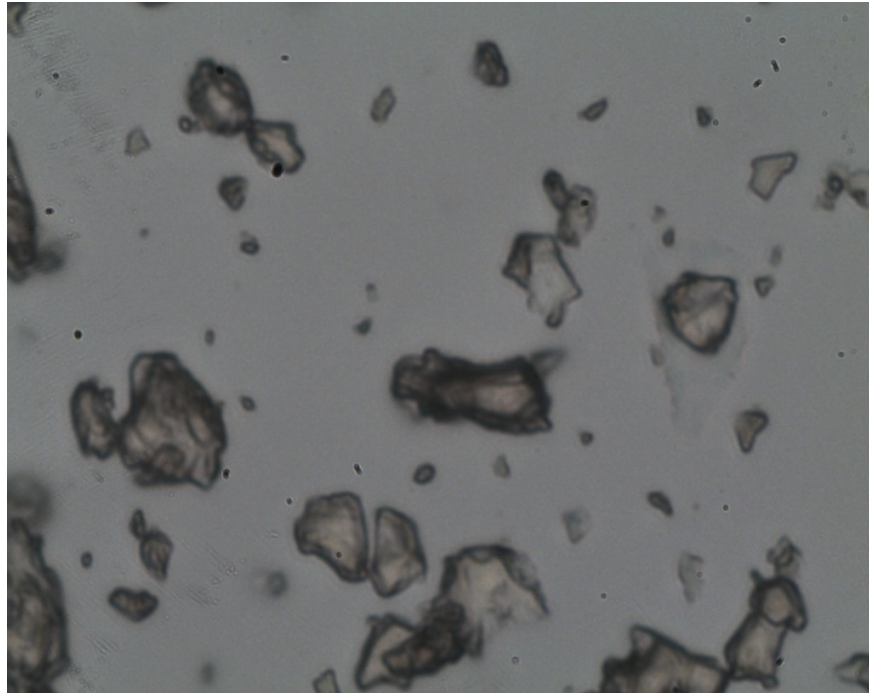


Illustrazione 2.7: Polvere di caffè ottenuta per macinazione

L'immagine 2.7, ottenuta attraverso il microscopio ottico, mostra chiaramente che il materiale è irregolare e più o meno appiattito o scagliiforme: la *roundness* può scendere anche sotto 0,4, ben lontana dal concetto di sfera equivalente per il calcolo dei diametri.

2.2.2 Misure delle di shear

Con l'utilizzo del *Powder Flow Tester* della *Brookfield Engineering Lab, Inc.* si misurano le proprietà coesive delle polveri. Il tester compatta la polvere e misura lo sforzo di cedimento; ottenuti vari punti costruisce la *flow function*, indicativa del comportamento della polvere.

Viene provata la miscela arabica con la luce tra le macine posizionata (*l*) a 0, 5 e 10; la

miscela robusta, per confronto, a 5.

Tabella 2.3: *Dati di coesività ricavati con PFT.*

Miscela	<i>l</i>	Densità [kg/m³]	Pendenza flow function	Angolo frizione interna [°]
arabica	0	377,2	0,51	54
	5	299,3	0,33	50,9
	10	276,6	0,21	46,7
robusta	5	321,1	0,27	50

All'aumentare delle dimensioni, le polveri hanno un comportamento meno coesivo; la miscela robusta, a parità di luce tra le macine, risulta più scorrevole sia per le dimensioni mediamente maggiori, sia per la minore quantità di olii contenuti nei chicchi.

3. Prove Preliminari

Come approccio preliminare, è valutata per prima cosa la variabilità del peso di macinato e il problema del deposito. Il macinino aveva settate delle condizioni *di fabbrica* ($t= 2,2s$; $l= 5$) e montata una macina in acciaio, qui denominata *grigia*.

Sono state effettuate 30 prove consecutive a condizioni ambientali fissate, di ogni macinazione viene pesato il prodotto e registrato in tabella.

Tabella 3.1: Prove sulla regolarità della dose di caffè macinato.

Miscela	arabica	Macina	grigia
T [°C]	21	t [s]	2,2
Hr%	36	l	5
n°prova	Peso [g]	n°prova	Peso [g]
1	7,68	16	9,01
2	9,43	17	9,52
3	9,18	18	8,15
4	9,28	19	10,29
5	7,17	20	9,03
6	12,04	21	9,69
7	9,25	22	8,4
8	9,54	23	8,42
9	9,15	24	7,34
10	7,7	25	11,64
11	11,8	26	8,48
12	9,21	27	8,76
13	8,12	28	8,05
14	8,21	29	11,22
15	11,67	30	9,17
Media	9,22	Dev. st.	1,36
<i>Note: Forte sporramento, flusso in uscita quasi a spruzzo</i>			

La dose media ottenuta con questi settaggi è superiore a quella richiesta, ma il problema principale è la deviazione standard decisamente alta che si riflette su una forte oscillazione della quantità di macinato per prova.

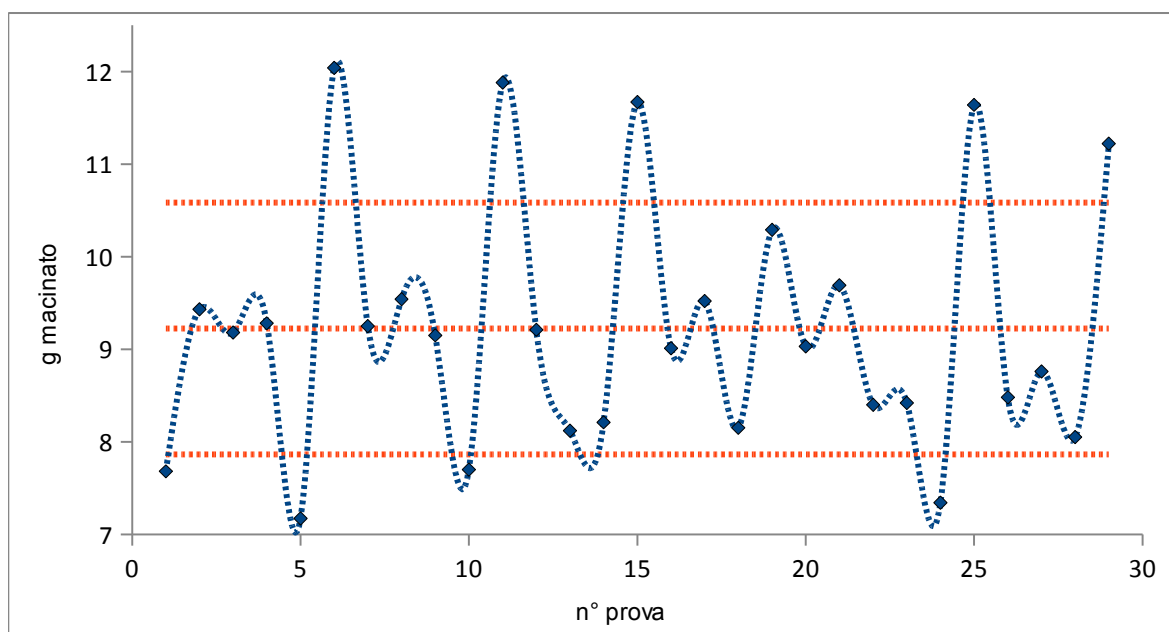


Illustrazione 3.1: Fluttuazioni della dose di caffè macinato per miscela arabica senza nessuno dispositivo di regolazione del flusso.

Il flusso in uscita è molto scomposto, in alcuni frangenti quasi a getto; il caffè si deposita sul beccuccio, presumibilmente a causa delle cariche elettrostatiche, a volte coprendolo quasi completamente. Si può dire che il deposito ha un andamento erratico. Durante una prova, del caffè si può fermare sullo scivolo che in macinazioni successive viene trascinato via: nel primo caso si otterrà una dose scarsa, nel secondo una eccessiva.

Dopo un breve consulto con l'azienda riguardo questa problematica, viene introdotta la prima soluzione tecnica per regolarizzare il flusso e minimizzare l'accumulo.

In un intaglio nella parte alta del raccordo tra scivolo e macchina, viene posizionato un lamierino basculante di alluminio con un peso incollato dal lato esterno, che occlude quasi totalmente il condotto di uscita. Si valuta, così, l'impatto della miglioria.



Illustrazione 3.2: Particolare dello scivolo di deflusso con otturatore basculante e peso.

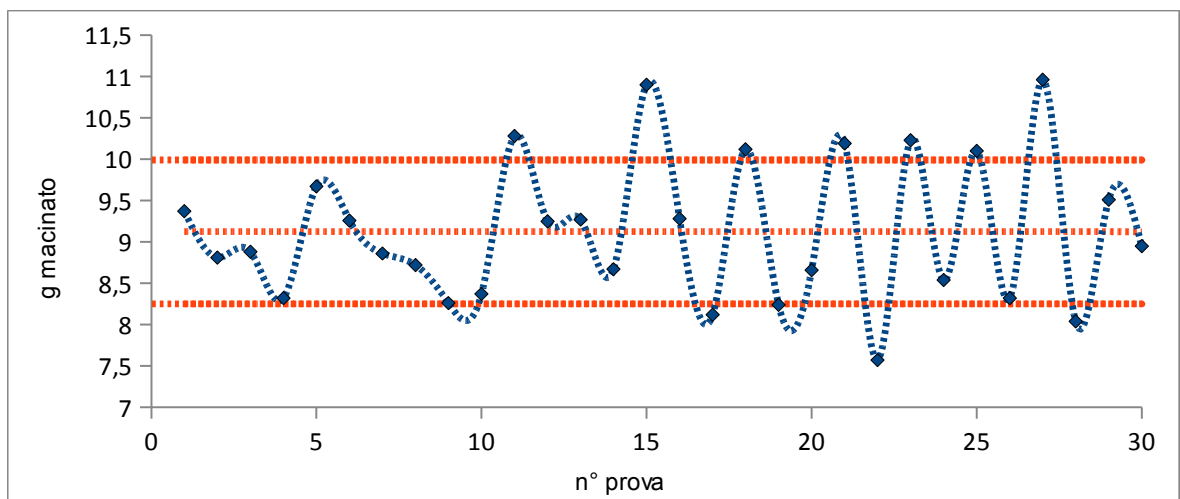


Illustrazione 3.3: Fluttuazioni della dose di caffè macinato per miscela arabica con porta basculante in uscita.

L'andamento fluttuante non è cambiato di molto, ma il flusso di materiale risulta molto più ordinato. Si può anche apprezzare una diminuzione del fenomeno di deposizione.

Tabella 3.2: Prove sulla regolarità della dose di caffè, con otturatore basculante.

Miscela	arabica	Macina	grigia
T [°C]	23	t [s]	2,2
Hr%	45	l	5
n°prova	Peso [g]	n°prova	Peso [g]
1	9,37	16	9,28
2	8,81	17	8,12
3	8,88	18	10,12
4	8,32	19	8,24
5	9,67	20	8,66
6	9,26	21	10,19
7	8,86	22	7,57
8	8,72	23	10,23
9	8,26	24	8,54
10	8,37	25	10,1
11	10,28	26	8,32
12	9,25	27	10,96
13	9,27	28	8,04
14	8,67	29	9,51
15	10,9	30	8,95
Media	9,12	Dev. st.	0,87
<i>Note:</i> Sporramento quasi nullo.			

Regolarizzando il flusso, diminuisce anche il fenomeno di deposizione, portando ad un diminuzione della variabilità del peso di macinato. Da qui in avanti, tutti gli esperimenti verranno eseguiti con la portina montata, salvo eccezioni dove indicato.

Si va ora a valutare l'impatto dei residui sul risultato del processo. Dopo aver effettuato una macinazione, si raccoglie e si pesa la polvere depositata sullo scivolo.

Tabella 3.3: Prove sulla quantità di caffè depositato sul beccuccio.

Miscela	arabica	Macina	grigia
T [°C]	23	t [s]	2,2
Hr%	45	l	5
Macinato		Deposito	
n°prova	Peso [g]		Peso [g]
1	8,75		0,61
2	8,83		0,85
3	9,04		0,74
4	8,81		0,4
5	8,15		0,66
6	8,52		0,5
7	9		0,54
8	9,03		0,48
9	8,67		0,64
10	9,13		1,11
11	8,94		0,49
12	7,95		0,59
13	8,85		0,57
14	8,5		0,62
15	8,3		0,82
16	9		0,46
17	8,31		0,84
18	8,38		0,39
19	8,28		0,51
20	8,68		0,59
21	8,27		0,76
22	8,48		0,32
23	8,27		0,74

24	8,92		0,56
25	8,44		0,64
26	7,87		0,57
27	8,13		0,66
28	8,54		0,66
29	7,64		0,5
30	7,24		0,62
Media			
	8,6		0,61
Dev. st.			
	0,51		0,16
<i>Note: raccolta e peso del deposito ad ogni macinazione.</i>			

La deviazione standard del macinato si dimezza quasi, rientrando in valori accettabili per il commercio della macchina (tolleranza di $\pm 0,5$ g): si può affermare che questo valore corrisponde alla variabilità intrinseca del processo.

La media registrata è inferiore a quella delle prove senza pulizia: questo perchè parte del caffè che prima veniva raccolto, in questo tipo di test viene rilevato come deposito.

Si può quindi attribuire una buona parte delle fluttuazioni ai 0,61 grammi medi di caffè che si fermano sullo scivolo.

Su suggerimento dell'esperienza maturata si è provato a lavorare con chicchi di caffè pre-frantumati, con l'idea di creare un flusso più regolare in entrata alla camera di macinazione, al fine di stringere ancora la deviazione standard intrinseca. I grani vengono battuti all'interno di sacchetto di plastica con un martello fino ad ottenere, circa, la rottura del 50% dei chicchi.

Tabella 3.4: Prove sulle fluttuazioni della dose di caffè, con chicchi prefrantumati

Miscela	arabica	Macina	grigia
T [°C]	20	t [s]	2,2
Hr%	25	l	5
n°prova	Peso [g]	n°prova	Peso [g]
1	8,5	16	10,76
2	9,92	17	10,1
3	11,04	18	9,43
4	9,8	19	8,95
5	8,58	20	9,88
6	10,81	21	9,84
7	10,1	22	10,64
8	9,59	23	8,6
9	10,17	24	10,78
10	9,96	25	9,46
11	8,82	26	9,82
12	9,29	27	9,24
13	9,72	28	9,09
14	9,85	29	9,69
15	9,78	30	9,31
Media	9,72	Dev. st.	0,68
<i>Note:</i> chicchi pre-frantumati senza pulizia.			

Come sperato, la deviazione standard decresce rispetto allo 0,87 della prova in *Tabella 6.2*; si può così imputare una parte delle fluttuazioni ad una non regolare alimentazione delle macine.

Un altro aspetto esaminato è quello del livello di chicchi in tramoggia. Intuitivamente, vista l'alimentazione "a rifiuto", il battente non dovrebbe incidere sull'alimentazione poichè i grani cadono tra le macine solo quando quelli sottostanti vengono tritati.

Sono state effettuate 15 macinazioni, prima a tramoggia carica, poi quasi vuota. La polvere prodotta è stata raccolta e pesata e aggiunto un peso corrispettivo di chicchi in alimentazione.

Tabella 3.5: Prove sull'influenza del battente di chicchi in tramoggia.

Miscela	arabica	Macina	grigia
T [°C]	20	t [s]	2,2
Hr%	25	l	5
Carico		Vuoto	
n°prova	Peso [g]		Peso [g]
1	11,05		9,58
2	9,56		8,48
3	9,59		9,49
4	10,5		8,74
5	10,04		9,66
6	9,6		8,7
7	10,26		10,34
8	8,2		9,54
9	10,35		10,12
10	8,34		9,85
11	9,81		10,57
12	8,94		11,3
13	8,65		9,89
14	9,68		9,75
15	8,53		10,61
Media	9,54	Media	9,77
Dev. st.	0,85	Dev. st.	0,77
<i>Note:</i> prove al variare del battente.			

Come si immaginava, il battente non ha praticamente nessuna influenza sul processo.

Terminata l'indagine dei disturbi al processo individuati, si valuta l'impatto della materia prima: i chicchi di caffè.

Come già detto, vi sono due specie di chicchi, molto differenti tra loro: l'arabica e la robusta, con la prima contenente una più alta percentuale di olii.

Innanzitutto, con un calibro, è stato misurato il diametro maggiore di un campione di chicchi per entrambe le tipologie di caffè. Il diametro maggiore medio della robusta è

risultato di 0,96 cm, mentre quello dell'arabica di 1,16cm. Si eseguono ora le solite prove per valutare il comportamento della miscela di robusta.

Tabella 3.6: Prove sulla fluttuazione della dose per miscela robusta.

Miscela	robusta	Macina	grigia
T [°C]	24	t [s]	2,2
Hr%	54	l	5
n°prova	Peso [g]	n°prova	Peso [g]
1	6,94	16	7,69
2	9,35	17	7,87
3	7,79	18	8,74
4	10,1	19	9,22
5	9,71	20	8,05
6	8,67	21	8,77
7	8,5	22	7,9
8	7,42	23	8,88
9	9,12	24	9,28
10	9,76	25	10,83
11	8,16	26	7,67
12	9,13	27	9,24
13	7,83	28	8,14
14	9,26	29	8,28
15	8,6	30	7,22
Media	8,6	Dev. st.	0,9
<i>Note:</i> Discreto sporcammento.			

La media è leggermente più bassa mentre la deviazione standard è aumentata, anche per un deposito più cospicuo (0,72 g in media). Occorrerà capire a cosa è dovuto questo fenomeno, probabilmente gli olii contenuti nel caffè hanno qualche inerzia col fenomeno.

4. Analisi Sperimentale

4.1 Variabili operative

Le variabili operative su cui si può agire per regolare la dose di macinato sono il tempo di macinazione (t) e la luce tra le macine (l).

Il tempo si setta utilizzando l'interfaccia elettronica, con intervallo minimo di un decimo di secondo. La luce tra le macine si regola con una leva che si muove lungo una scala graduata (da 0 a 10). Sono prima state effettuate delle prove variando il tempo e mantenendo costante l a 5. Il macinato viene prodotto e pesato.

Tabella 4. 1: Test sulla dose di caffè al variare del tempo di macinazione.

Miscela	arabica	Macina	grigia
T [°C]	20	l	5
Hr%	36		
N° prova	t [s]		
	1	2	4
1	3,69	7,91	16,73
2	4,31	7,87	16,16
3	4,32	8,38	17,81
4	4,5	7,09	15,13
5	4,41	11,71	16,74
6	4,29	9,88	16,86
7	4,06	7,77	16,42
8	4,18	8,05	17,33
Media	4,21	8,58	16,65
Dev. st.	0,23	1,4	0,75
Media/s	4,25	4,29	4,16
<i>Note:</i>			

All'aumentare del tempo di macinazione, come facilmente intuibile, il peso di macinato cresce. Si può affermare che l'andamento è praticamente lineare.

Ora, tenendo fisso il tempo a 2,2 secondi, si fanno degli esperimenti al variare di l .

Tabella 4.2: Test sulla dose di caffè e materiale residuo al variare della luce tra le macine.

Miscela	arabica		Macina	grigia		
T [°C]	20		t [s]	2,2		
Hr%	36					
N° prova	l					
	0		5		10	
	macinato	residuo	macinato	residuo	macinato	residuo
1	6,21		9,08		9,15	0,46
2	6,69		9,16		8,77	0,9
3	5,98		8,78		8,68	0,98
4	6,79		8,37		8,89	1,33
5	7		8,62		8,59	0,71
6	4,87		8,73	0,58	9,32	1,21
7	6,15		8,68	0,21	8,3	1,55
8	6,31		8,67	0,35	8,91	1,44
9	6,2		8,8	0,4	8,49	0,86
10	5,75		8,79	0,3	9,01	1,51
11	6,31		8,58	0,26	8,69	1,38
12	5,88		8,34	0,25	9,17	1,52
Media	6,18		8,72	0,34	8,83	1,15
Dev. st.	0,58		0,24	0,13	0,3	0,36
<i>Note:</i>						

Aumentado lo spazio tra le macine, la produttività della macchina cresce.

Si è osservato un forte aumento della deposizione di particelle sul beccuccio, per cui si è scelto di valutare anche la quantità dei residui, anch'essi crescono con l .

Ragionando, si è arrivati alla conclusione che aumentare la luce tra le macine corrisponde ad avere particelle di dimensioni mediamente maggiori. Per cui, nella stessa unità di tempo, il macinacaffè riesce a trattare una maggiore quantità di chicchi. Per confermare questo è necessario avere un' idea delle Particle Size Distributions a diversi l .

Si cerca di correlare la variazione della luce tra le macine con il macinato raccolto.

Tabella 4.3: Prove per la correlazione tra l e grammi di caffè macinato

Miscela	arabica		Macina		grigia
T [°C]	20		t [s]	2,2	
Hr%	36				
l	0	3	5	8	10
N° prova					
1	5,94	8,45	9,56	10,37	10,28
2	6,26	7,71	9,23	9,71	10,48
3	4,83	8,31	8,52	9,69	10,16
4	5,45	7,84	9,25	10,33	10,12
5	6,09	8,47	8,8	10,26	10,32
Media	5,71	8,16	9,07	10,07	10,27
Dev. st.	0,58	0,36	0,41	0,34	0,14
<i>Note:</i>					

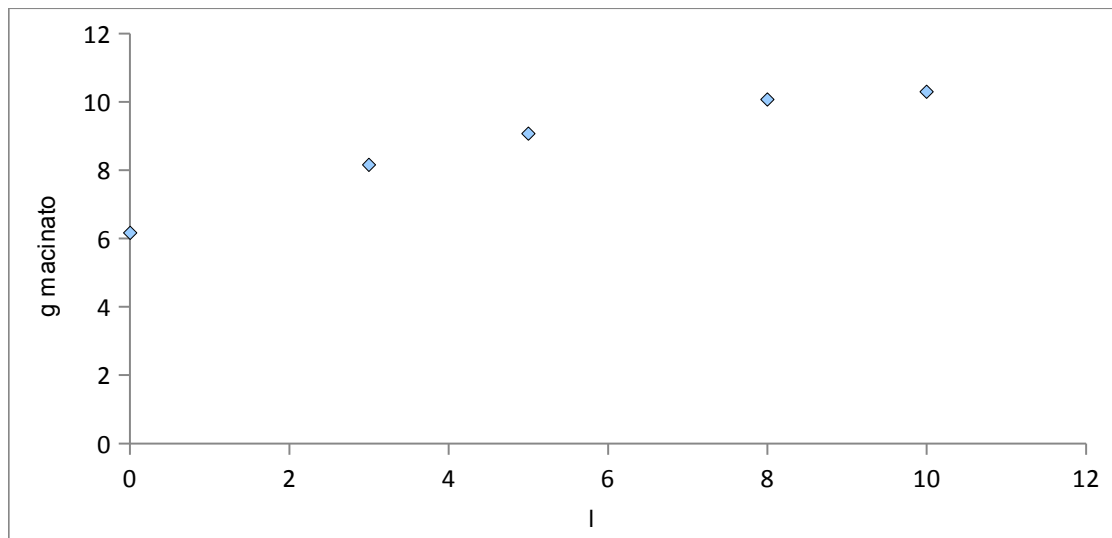


Illustrazione 4. 1: Curva dei grammi di caffè macinato in funzione della apertura tra le macine.

Pare chiaro che l'andamento non sia lineare: interpolando risulta un $R^2=0,91$.

Aumentando di un ordine la linea di tendenza si ottiene una parabola $y=-0,046x^2+0,911x+5,74$, con $R^2=0,99$.

4.2 Curve parametriche

Visto il comportamento del processo al variare di l e t , si cercano delle correlazioni utili nell'attività industriale per il settaggio della macchina e per comprenderne la produttività.

4.2.1 Metodo d'analisi

Dopo aver caricato la tramoggia e regolato la luce tra le macine, si effettua una macinazione preliminare *di avvinazione* in modo da eliminare eventuali disturbi dovuti a prove precedenti (accumuli di materiale eterogeneo in camera, sporcamento, etc.).

Vengono poi eseguite 5 macinazioni a settaggio costante. Ogni prova viene pesata e registrata; al termine di ogni singola macinazione lo scivolo viene pulito con un pennellino e il residuo così raccolto viene pesato e registrato. Ottenuti i dati relativi a 5 macinazioni e 5 raccolte di residuo, questi vengono mediati tra loro in modo da ottenere un solo valore che servirà a costruire delle curve parametriche.

Si cambia quindi settaggio della macchina.

I tempi presi in considerazione nelle prove sono di 0,5, 1, 2 e 3 secondi.

La luce è regolata secondo una scala graduata da 0 a 10 e si sono effettuate prove alle posizioni 0, 2, 5, 7 e 10.

4.2.2 Risultati macinato

Si sono prima costruite delle curve parametriche in l , con in ascissa il tempo e in ordinata i grammi di caffè. Attraverso regressione lineare, imponendo il passaggio per $(0,0)$, si ottiene un fascio di rette.

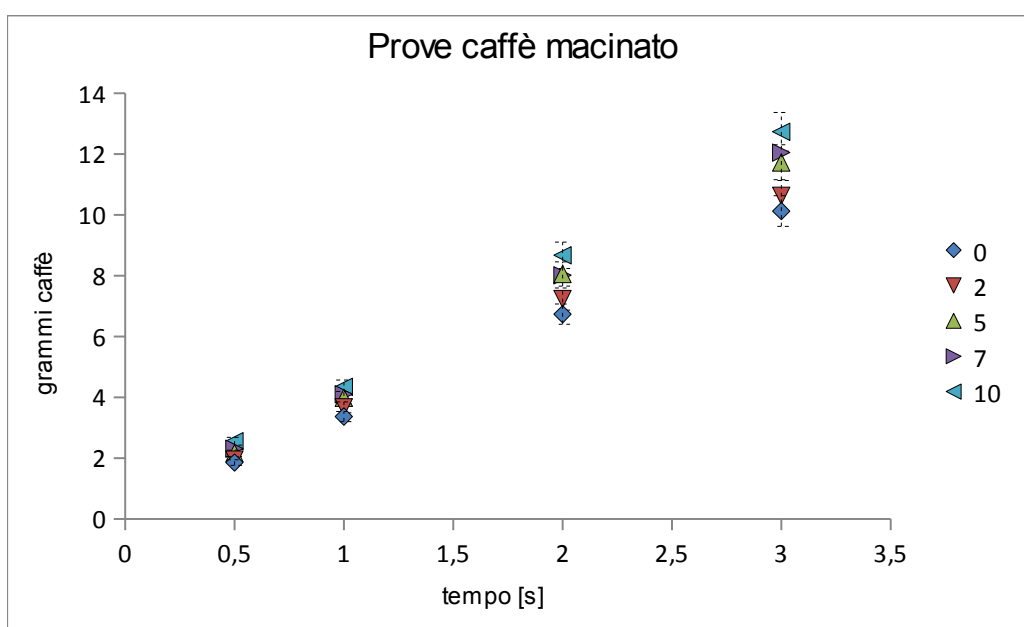


Illustrazione 4.2: Grammi di caffè macinato contro il tempo di macinazione al variare della luce tra le lame.

Il coefficiente angolare delle rette ha le dimensioni di $[g/s]$ ed è indicativo della produttività media della macina a determinata configurazione.

I punti sono ben allineati e si nota chiaramente la parametricità rispetto alla luce di passaggio.

Tabella 4.4: Pendenze delle rette di regressione parametriche in l .

Miscela	Pendenza [g/s]				
	0	2	5	7	10
arabica	3,33	3,48	3,86	3,91	4,11
robusta	3,37	3,86	4,22	4,26	4,31

La miscela robusta risulta leggermente più produttiva, e si nota come la dipendenza da l non sia propriamente lineare. Da qui in avanti per semplicità saranno riportati solo dati solo delle colonne 0, 5 e 10.

Con le rette caratteristiche di ogni configurazione, al momento del montaggio del macinacaffè nell'esercizio commerciale la regolazione ottimale risulta immediata.

(Si ricorda che non vi è una vera e propria scelta ottimale della granulometria, poichè dipende dalle caratteristiche organolettiche del caffè, dalle preferenze individuali e dal metodo di produzione della bevanda).

4.2.3 Risultati residui

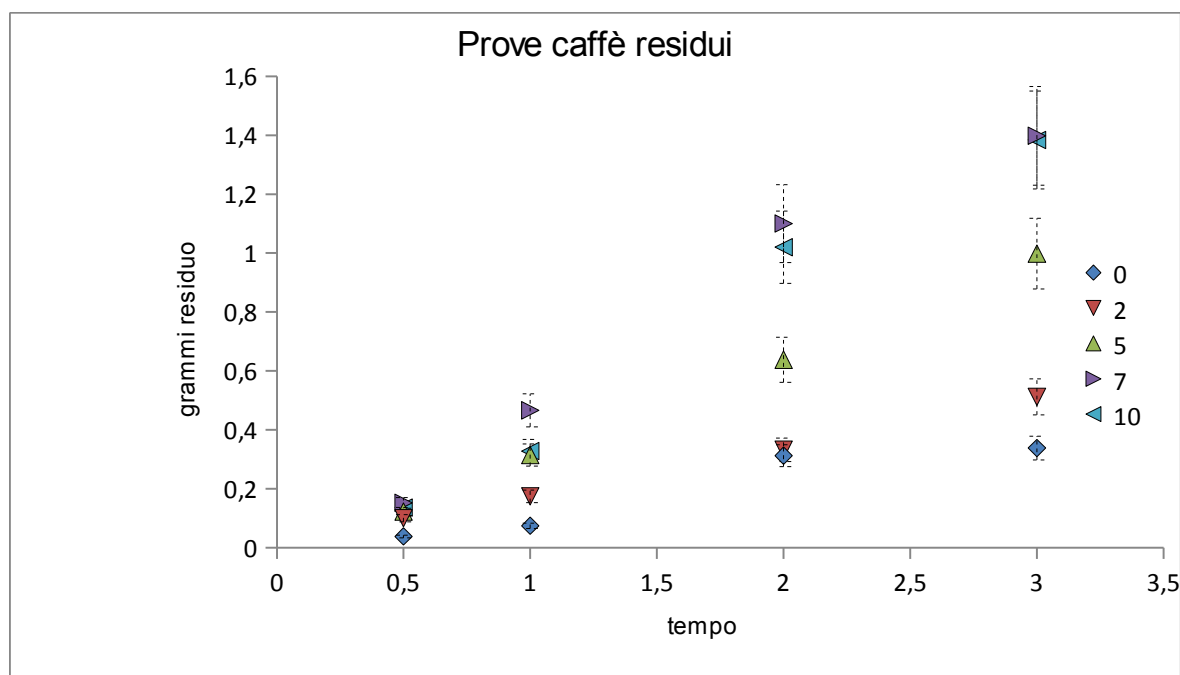


Illustrazione 4.3: Deposizione di polvere sul beccuccio nel tempo, al variare della luce tra le lame.

I punti ottenuti dalle prove sui residui sono un pò interlocutori. E' difficile, e poco interessante, ricavarne qualcosa di utilizzabile matematicamente, ma l'osservazione degli andamenti ci suggerisce qualcosa riguardo al fenomeno di accumulo di polvere sul beccuccio.

Tabella 4.5: Dati sui residui medi, in funzione della luce tra macine.

Miscela	Residui [g/s]		
	0	5	10
arabica	0,42	1,2	1,5
robusta	1,34	1,52	1,44

Per certo la polvere è moderatamente coesiva e si carica elettrostaticamente durante la macinazione.

Ovvio che a l e t maggiori vi sia mediamente più accumulo, poichè passano più particelle e di peso mediamente maggiore.

Le particelle fini sono più coesive, quindi teoricamente le più soggette al fenomeno di deposizione, ma le osservazioni sperimentali sembrano smentire quest'idea.

4.3 Macine

Montate le lame sulla macchina, si procede alle prove sperimentali, valutando la produttività dei vari set.

4.3.1 Risultati macine in acciaio

Tabella 4.6: Produttività delle diverse macine, al variare della luce di passaggio.

Nome	Miscela	Produttività [g/s]		
		0	5	10
grigia	arabica	3,33	3,86	4,11
	robusta	3,37	4,22	4,31
oro	arabica	1,21	2,91	3,6
	robusta	2,05	3,08	3,43
rossa	arabica	1,24	2,69	3,6
	robusta	1,93	2,92	3,47
viola	arabica	1,1	2,4	2,84
	robusta	1,62	2,64	2,82

Queste nuove macine hanno una produttività molto inferiore rispetto alla grigia classica montata. dall'inizio delle sperimentazione. Sicuramente incide qualche fenomeno legato all'usura o sporcamiento della superficie.

Tabella 4.7: Residui medi depositati sullo scivolo per diverse macine, in funzione di l.

		Residui [g/s]		
Nome	Miscela	0	5	10
grigia	arabica	0,42	1,2	1,5
	robusta	1,34	1,52	1,44
oro	arabica	0	0	0,29
	robusta	0	0,22	0,68
rossa	arabica	0	0	0,36
	robusta	0	0,27	0,69
viola	arabica	0	0	0,21
	robusta	0	0,11	0,57

Ritorna subito all'occhio il fatto che i fini non subiscono la deposizione, e che la robusta è più problematica. Le tre macine nuove sono praticamente equivalenti.

4.3.2 Risultati macine in ceramica

Tabella 4.8: Produttività delle macine in ceramica in funzione di l.

		Produttività [g/s]		
Nome	Miscela	0	5	10
Ceramica std	arabica	/	1,96	2,45
	robusta	/	2,41	3,05
Ceramica HP	arabica	3,81	4,48	4,52
	robusta	4,23	4,89	5,24

La ceramica standard ha un produttività modesta, inoltre lavorando con particelle fini presenta dei problemi di adescamento ed espulsione della polvere. Non è ben chiaro il motivo, ma si pensa sia legato a problemi di scorrevolezza del materiale tra le macine. Questa mola non è stata ulteriormente testata.

La mola in ceramica HP si presenta con una produttività elevata, dovuta all'inclinazione dei denti e particelle leggermente maggiori: queste caratteristiche spingeranno in seguito ad un'indagine più approfondita.

Tabella 4.9: Residui medi per macine in ceramica al variare della luce tra le lame.

		Residui [g/s]		
Nome	Miscela	0	5	10
Ceramica std	arabica	/	/	/
	robusta	/	/	/
Ceramica HP	arabica	0,03	0,15	0,27
	robusta	0,67	0,73	1,39

Come già detto, la mola standard ha dato grossi problemi per cui la raccolta dei residui è stata praticamente trascurabile; La macina ad altre prestazioni invece continua a spiccare, portando a dei residui notevolmente bassi.

I differenti materiali non sembrano incidere molto sulla produttività, ma una superficie più dura sicuramente sarà soggetta a minor usura, quindi le lame avranno una vita più lunga.

4.4 Analisi sulla variabilità

Il metodo d'indagine presentato fino a qui non rispecchia il reale utilizzo del macinacaffè. L'utilizzatore finale difficilmente sarà predisposto a pulire dopo ogni caffè il beccuccio. Per questo l'esperienza risulta distante dalla realtà dei fatti, dove la macchina macina continuamente chicchi.

Per studiare il comportamento del macinino nelle reali condizioni di utilizzo, è necessario avviare una diversa campagna di prove. Vengono eseguite 30 macinazioni consecutive con le impostazioni di fabbrica ($t=2,2s$; $l=5$), senza mai pulire il beccuccio. Con i dati ottenuti ricaviamo media e deviazione standard. Per confrontare tra di loro diverse prove si introduce un indice adimensionale I , che non è altro che la deviazione standard relativa, ovvero il rapporto tra scarto quadratico medio e media, qui calcolato come percentuale in modo da avere numeri più facilmente trattabili. Per allinearsi con la pratica industriale, viene riportata anche la resa di caffè macinato in kg/h.

Tabella 4.10: Riepilogo delle prove sulla variabilità della dose.

Macina	Miscela	Media	Dev. st.	Produttività [kg/h]	<i>I</i>
Grigia	arabica	9,12	0,87	14,92	9,54
	robusta	8,6	0,9	14,07	10,47
Oro	arabica	6,23	0,19	10,19	3,05
	robusta	7,76	0,6	12,7	7,73
Rossa	arabica	6,17	0,2	10,1	3,24
	robusta	7,11	0,49	11,63	6,89
Viola	arabica	5,23	0,22	8,56	4,21
	robusta	6,66	0,51	10,9	7,66
Ceramica HP	arabica	11,3	0,6	18,49	5,31
	robusta	11,68	0,86	19,11	7,36

Sono preferibili le situazioni in cui *I* è inferiore, il che indica una dispersione bassa per una produttività alta.

Le macine nuove hanno degli indici particolarmente bassi, dovuti alla bassa deviazione standard; ma occorre anche notare che hanno una produttività inferiore anche del 30% rispetto alla macina grigia, e tutto questo è influenzato da usura e sporcamento.

La macina in ceramica High Performances ha una resa molto elevata, mantenendo un *I* contenuto.

5. Analisi Dati Sperimentali e Verifiche

Dalle prove svolte fin qui, si è osservato che il fenomeno di deposizione della polvere esiste ed incide sulla variabilità della dose, ma non è una situazione così critica; è principalmente un aspetto estetico.

La deposizione della polvere è molto più accentuata per particelle grosse e con miscela robusta (contenente meno olii): le situazioni in cui teoricamente il fenomeno dovrebbe essere meno importante.

Questo fenomeno si ipotizza di giustificarlo pensando al metodo di trasporto della polvere: quando il macinato passa attraverso il raccordo per giungere alla discesa, il flusso viene strozzato dal lamierino e quindi la polvere subisce una compattazione. Si formano così delle zolle di caffè che possiedono una densità apparente maggiore, a causa della compattazione, e fluiscono senza intoppi sullo scivolo verso il filtro. Difatti i casi in cui la coesività tra particelle è più intensa, la deposizione è un fenomeno trascurabile se non inesistente.

5.1 Conferma della teoria

Si cerca ora di confermare la teoria riguardante il residuo con prove che influiscano sulla forza adesiva delle polveri.

Come prima serie di esperimenti, si effettuano prove ad una umidità ambientale relativa controllata con un igrometro digitale ed umidificatore ambientale.

Affinchè la teoria venga empiricamente confermata, le prove ad Hr% più alta dovrebbero presentare minori fenomeni di accumulo.

Come secondo test di conferma: si lavora con chicchi di caffè a cui si addiziona dell'olio di semi in percentuali w/w variabili. Una maggiore percentuale di olio dovrebbe limitare i residui sul beccuccio.

5.1.1 Umidità relativa

Si prendono in considerazione le condizioni ambientali in cui si eseguono i test. Sulla temperatura non ha molto senso agirvi, poiché ha un range limitato e poco influente.

Invece, il comportamento al variare dell'umidità relativa risulta interessante.

E' noto dalla tribologia che un ambiente con umidità relativa superiore al 50% limita la produzione di cariche per sfregamento, inoltre l'umidità favorisce l'aggregazione delle polveri.

Per tutte le combinazioni di macine e miscele sono state effettuate nuove prove sulla variabilità, con un umidità relativa forzata intorno al 60%, e confrontate con i dati già ottenuti. Vengono riportate in tabella degli esempi chiarificatori, i dati completi si trovano in App. A.

Tabella 5.1: Confronto delle prestazioni delle diverse mole, con umidità relativa controllata.

Macina	Miscela	Media	Dev. st.	Produttività [kg/h]	I	Hr [%]
Grigia	arabica	9,12	0,87	14,92	9,54	40
	arabica	9,19	0,77	15,04	8,38	63
	robusta	8,6	0,9	14,07	10,47	33
	robusta	8,56	1,14	14,01	13,32	54
Oro	arabica	6,23	0,19	10,19	3,05	32
	arabica	6,4	0,15	10,47	2,34	59
Ceramica HP	arabica	11,3	0,6	18,49	5,31	32
	arabica	11,11	0,45	18,18	4,05	62
	robusta	11,68	0,86	19,11	7,36	44
	robusta	12,67	0,72	20,73	5,68	62

Si può affermare in linea generale, che un umidità più alta migliora le condizioni. Le particelle si agglomerano e soffrono meno dell'attrazione elettrostatica: difatti la deviazione standard ha una leggera flessione. La produttività sembra tendere a crescere, potrebbe essere spiegato col fatto che una minore quantità di caffè rimane attaccata ai vari componenti, cadendo invece nel filtro.

Per alcune di queste configurazioni sono state costruite anche le curve parametriche nel

grado di apertura delle macine, per verificare se effettivamente la resa aumenta.

Tabella 5.2: Confronto delle produttività delle macine al variare dell'umidità.

		Produttività [g/s]			
Macina	Miscela	0	5	10	Hr [%]
Grigia	arabica	3,33	3,86	4,11	36
	arabica	3,17	3,78	3,89	56
Cercamica HP	arabica	3,81	4,48	4,52	33
	arabica	4,16	5,15	5,35	62

Tabella 5.3: Dati sui residui medi con umidità controllata.

		Residui [g/s]			
Macina	Miscela	0	5	10	Hr [%]
Grigia	arabica	0,42	1,2	1,5	36
	arabica	0,13	0,56	1,51	56
Ceramica HP	arabica	0,03	0,15	0,27	33
	arabica	0	0	0,07	62

Per la macina grigia, l'umidità ha molto più peso sulle frazioni fini, evitando la formazione di residui, ed è un fattore significativo nel caso delle macine in ceramica HP.

Diminuendo sensibilmente il problema dei residui, la produttività aumenta poiché nel filtro viene trascinata più polvere.

5.1.2 Addizione di olio

I chicchi di miscela robusta vengono pesati e a loro vengono aggiunte delle quantità definite di olio di semi di girasole. Il caffè viene quindi macinato per valutarne il comportamento.

Tabella 5.4: Dati sul comportamento del processo dopo addizione di olio di semi ai chicchi.

<i>t</i> [s]	2,2s	Macina	grigia
<i>l</i>	5	Miscela	robusta
Media	Dev.st.	I	Olio [%w/w]
8,56	1,14	13,32	/
7,26	0,38	5,23	8,3
6,62	0,34	5,14	13,7

Aggiungendo l'8,3% di olio di semi si cerca di simulare la situazione dell'arabica.

Si nota che la modifica ha un certo peso sul processo. La deviazione standard cala sensibilmente, per cui l'olio regolarizza il flusso lubrificando le superfici e formando agglomerati che non si depositano sul beccuccio. Ma una adesività accentuata porta le particelle a formare zolle particolarmente pesanti che vengono trasportate più difficoltosamente, per cui la media ha un lieve calo.

5.2 Usura e sporcamento

Per avere un'idea dell'effetto dello sporcamento e dell'usura, si prendono in esame la macina grigia e la macina oro.

La prima, dopo tutte le prove effettuate, viene ripulita in un bagno ad ultrasuoni e verificate le sue caratteristiche.

Tabella 5.5: Confronto tra una macina sporca e la stessa lavata.

Nome	Miscela	Produttività [g/s]			
		0	5	10	
Grigia	arabica	3,33	3,86	4,11	
	arabica	2,18	3,12	3,8	Dopo pulizia

Come volevasi dimostrare, una macina sporca caffè e olii riesce a trasportare meglio la polvere, aumentando così la sua produttività. Non è pensabile avvicinarsi a numeri come quelli delle macine vergini, poiché l'usura rovina il filo delle lame e il bordo delle macine, peggiorando la triturazione e lasciando un'area maggiore per il passaggio delle particelle.

Per verifica, con la macina oro si effettuano prove in continuo per vedere se la produttività cresce nel tempo. Se ne prova la variabilità dopo oltre 5 chili di caffè macinato.

Tabella 5.6: Comportamento di una macina con l'aumentare dello sporcamento.

Macina	Miscela	Media	Dev. st.	Produttività [kg/h]	I	Note
Oro	arabica	6,23	0,19	10,19	3,05	vergine
	arabica	7,81	0,34	12,78	4,35	usata

Tutto tende ad aumentare come ci si aspettava, l'usura e lo sporcamento sono fattori che da un lato aiutano la produttività, ma dall'altro peggiorano la regolarità della dose. Questo comporta che dopo un periodo di rodaggio intorno ai 10 chili, sarebbe opportuno rifare la calibrazione della macchina per il controllo della dose.

5.3 Rete in uscita

Terminata l'analisi del processo e comprese le cause del fenomeno di deposizione, è stato suggerito all'azienda di agire sull'otturatore basculante per limitare i problemi.

L'idea è stata applicata, ma vista la grande variabilità delle situazioni (Hr%, miscele, PSD, etc.) in cui la macchina opera, non si è riusciti a trovare una soluzione rapida per soddisfare tutte le esigenze.

Se il peso legato al lamierino è troppo basso, l'effetto di compattazione risulta inefficace; al contrario se è il meccanismo è troppo pesante impedisce la corretta fuoriuscita del materiale, in casi estremi bloccandolo.

Inoltre, nel deflusso si formano delle zolle di materiale che ricadono nel filtro della macchina espresso e alcuni baristi-collaudatori hanno denunciato questo aspetto, prettamente estetico.

Occorre così pensare ad un nuovo metodo per risolvere le problematiche.

Si è arrivati all'idea di montare una griglia, una retina metallica, perpendicolare al condotto di uscita. Passando attraverso i fori la polvere è costretta a comprimersi ed il flusso, in linea teorica, risulta più regolare. Nel caso con il basculante, il flusso sembrava più ad impulsi: quando una massa sufficiente di polvere premeva sul lamierino, questo si inclinava, lasciando passare il caffè, per poi tornare alla posizione di riposo.

Sono state costruite emontate retine artigianali, a 8 fori con luce di 3 mm, a 4 fori con luce di 6mm e 2 fori verticali (fessure).

5.3.1 Rete a 8 fori

Le prove sono state interrotte quasi subito poichè la sezione di passaggio è risultata troppo stretta, la polvere si agglomerava e non riusciva a defluire, bloccando la macchina.

5.3.2 Rete a 4 fori

La rete a 8 fori viene tagliata in modo da ottenere 4 fori rettangolari.

Tabella 5.7: Dati produttività con rete in uscita al variare della luce tra le macine.

Macina	grigia	Produttività [g/s]		
Miscela	arabica	0	5	10
Meccanismo in uscita	lamiera	3,33	3,86	4,11
	rete	3,69	4,19	4,5

La produttività con la rete in uscita ha un lieve miglioramento.

Tabella 5.8: Dati dei residui con rete in uscita al variare della luce tra le macine.

Macina	grigia	Residui [g/s]		
Miscela	arabica	0	5	10
Meccanismo in uscita	lamiera	0,42	1,2	1,5
	rete	0	0,79	0,91

L'aumento della produttività è attribuibile al fatto che le particelle vengono trascinate dal flusso e hanno minor possibilità di fermarsi.

Si va ora ad analizzare la variabilità della dose alle condizioni di fabbrica ($l=5$; $t=2,2s$).

Tabella 5.9: Dati sulla variabilità della dose alle condizioni di fabbrica, in diverse condizioni.

Macina	Miscela	Media	Dev. st.	Produttività [kg/h]	I	Hr [%]	Meccanismo in uscita
Grigia	arabica	9,12	0,87	14,92	9,54	40	lamiera
	robusta	8,6	0,9	14,07	10,47	33	lamiera
	arabica	9,7	0,64	15,87	6,49	45	rete
	arabica	8,6	0,36	14,06	4,07	73	rete
	robusta	9,43	1,38	15,41	14,54	72	rete

I soliti andamenti rispetto all'umidità relativa sono confermati. L'indice I con la rete è sensibilmente diminuito, per cui pare essere una soluzione convincente. Si analizza ora il

comportamento del processo al variare di l , per valutare se le dimensioni delle particelle influiscono sull'efficacia dei meccanismi di uscita

Tabella 5.10: Effetti della PSD sulle prestazioni dei meccanismi d'uscita

Macina	Miscela	Media	Dev. st.	Produttività [kg/h]	I	l	Meccanismo in uscita
Grigia	arabica	9,12	0,87	14,92	9,54	5	lamiera
	arabica	9,7	0,64	15,87	6,49	5	rete
	arabica	6,59	0,46	10,78	6,98	0	rete
	arabica	9,71	0,44	15,89	4,53	10	rete
	arabica	6,34	0,37	10,37	5,84	0	lamiera
	arabica	9,37	0,56	15,33	5,98	10	lamiera

A prima impressione, la rete peggiora le prestazioni con le particelle fini. Probabilmente, agendo solo come strozzatura e non come una vera e propria forza antagonista, riesce compattare meglio le particelle grossolane. I ha un comportamento abbastanza lineare contro l nel caso della retina; mentre presenta un picco centrale quando viene montato il lamierino basculante. Questo effetto è probabilmente da reputarsi dipendente dal peso stesso applicato al lamierino.

5.3.3 Rete a 2 fori-fessure

Prove eseguite a condizioni ambientali standard e con settaggi di fabbrica.

Tabella 5.11: Confronto tra i meccanismi di uscita.

Macina	Miscela	Media	Dev. st.	Produttività [kg/h]	I	Meccanismo in uscita
Grigia	arabica	9,12	0,87	14,92	9,54	lamiera
	arabica	9,7	0,64	15,87	6,49	Rete 4x2
	arabica	9,21	1,05	15,07	11,44	Rete 2x2

La produttività, come sempre, non viene modificata, ma la deviazione standar aumenta pericolosamente. Probabilmente la rete è a maglie troppo larghe per avere un effetto

sensibile sulla polvere.

Tabella 5.12: Effetti delle dimensioni delle particelle sulla variabilità della dose.

Macina	grigia	<i>l</i>	Media	Dev.st	Produttività [kg/h]	<i>I</i>
Miscela	arabica	0	7,29	1,17	11,93	15,66
		5	9,21	1,05	15,07	11,44
		10	9,97	0,78	16,31	7,78

Viene ribadito ancora il fatto che la rete agisce molto più efficacemente sulle frazioni grossolane. Le prestazioni sono comunque insoddisfacenti e la soluzione non sembra attuabile.

5.4 Regolazione di tensione di corrente

Agire sulla parte elettrica della macchina non è così semplice, poichè il motore è direttamente collegato con la scheda elettronica; lavorare con corrente sotto i 150 V diventa problematico poichè la scheda elettronica non è alimentata in modo corretto e la macchina si spegne.

La teoria indica il numero di giri per un motore sincrono a 50 Hz a 1200 rpm, che vengono verificati con una telecamera ad alta velocità.

Si varia la tensione di corrente con un regolatore appositamente costruito, e sempre con la telecamera ad alta velocità vengono conteggiati gli rpm delle lame a scarico. Non si nota una variazione significativa, probabilmente non trovando forze contrastanti, il motore riesce a rimanere a regime.

Per cui, si regola la tensione a 180 V, circa 1100 rpm, si carica la macchina con il caffè e si effettuano le prove sulla varianza. In questo caso non sono noti gli effettivi rpm, poichè non è possibile filmare le macine a tramoggia carica. La prova quindi risulta sommariamente qualitativa.

Per sicurezza ci si posiziona in una situazione notoriamente critica, utilizzando miscela robusta con *l* pari a 10 e tempo di 3s.

Tabella 5.13: Prove di varianza con regolatore di tensione.

Macina	grigia	t [s]	3	
Miscela	robusta	l	10	
	Macinato		Residui	
V	Media	Dev. st.	Media	Dev. st.
220	14,41	0,64		
	13,68	0,65	0,81	0,2
180	14,33	0,86		
	13,4	0,57	0,84	0,24

Le due prove sono sostanzialmente equivalenti, per cui il variatore di tensione non ha agito come ci si aspettava. Probabilmente per legare il *tribocharging* agli rpm delle macine occorre scollegare il motore della parte elettronica. Ci si aspettava che una diminuzione dei giri portasse ad una diminuzione delle cariche formate, al fine di limitare l'adesione alle parti metalliche.

Spingendosi a tensioni ancora più basse, 160V, la macchina ha un comportamento anomalo e in alcuni casi non riesce a trasportare la polvere.

6. Considerazioni finali

E' stato richiesto di studiare il comportamento di un macinacaffè, al fine di mantenere il più costante possibile la dose prodotta dalla macchina.

E' stato dimostrato come il processo sia abbastanza aleatorio e le variabili che entrano in gioco sono molte e difficilmente controllabili. Per prime, le caratteristiche del caffè che variano tra le due miscele disponibili ma anche nel tempo, perchè non ci si può attendere che tutte le partite di caffè siano identiche. In secondo luogo vi sono le variabili operative della macchina: la luce tra le macine e il tempo di macinazione; vi si può agire facilmente e sono abbastanza chiari i loro effetti. Uno spazio maggiore tra le lame produce della polvere di dimensioni maggiori, quindi una produttività maggiore; la dose di caffè dipende linearmente dal tempo di macinazione.

C'è una variabilità intrinseca del processo, che è causata dal meccanismo di alimentazione dei chicchi e dal meccanismo di trasporto ed espulsione della polvere.

E' stato richiesto di indagare il comportamento triboelettrico del materiale, e legarlo al fenomeno di deposizione. E' stato appurato il fatto che la polvere si carica per sfregamento, ma il problema è dipendente principalmente dalle proprietà di scorrevolezza delle particelle. E' stata testata l'efficacia di un dispositivo di deflusso, un otturatore basculante, e proposta e verificata una nuova soluzione, la rete in uscita.

In futuro, per migliorare la conoscenza del processo, si consigliano altri fattori su cui agire. In prima battuta, verificare se uno scarico verticale e non inclinato è ugualmente problematico. Poi agire sul volume delle camera di macinazione: variare il volume di accumulo, aumentare il numero di setti o ragionare sulla geometria del condotto in uscita.

Intuitivamente, diminuire il volume delle camere di accumulo, o aumentare i setti, dovrebbe portare allo smorzamento delle fluttuazioni dovute al trasporto della polvere grazie ad una miglior compattazione e a minori possibilità di ristagno del materiale.

Il foro di uscita è piano rispetto alle pareti della camera, ma il moto della polvere è angolare orario e non radiale: un invito, una smussatura dello spigolo, potrebbe facilitare il deflusso del caffè.

Appendice A

Riepilogo risultati delle prove a umidità controllata

Macina	Miscela	Media	Dev. st.	Produttività [kg/h]	<i>I</i>	Hr [%]
Grigia	arabica	9,12	0,87	14,92	9,54	40
	arabica	9,19	0,77	15,04	8,38	63
	robusta	8,6	0,9	14,07	10,47	33
	robusta	8,56	1,14	14,01	13,32	54
Oro	arabica	6,23	0,19	10,19	3,05	32
	arabica	6,4	0,15	10,47	2,34	59
	robusta	7,76	0,6	12,7	7,73	35
	robusta	8,09	0,54	13,24	6,67	69
Rossa	arabica	6,17	0,2	10,1	3,24	35
	arabica	6,29	0,18	10,29	2,86	66
	robusta	7,11	0,49	11,63	6,89	35
	robusta	7,43	0,42	12,16	5,65	66
Viola	arabica	5,23	0,22	8,56	4,21	32
	arabica	5,41	0,19	8,85	3,51	59
	robusta	6,66	0,51	10,9	7,66	32
	robusta	6,99	0,47	11,44	6,72	59
Ceramica HP	arabica	11,3	0,6	18,49	5,31	32
	arabica	11,11	0,45	18,18	4,05	62
	robusta	11,68	0,86	19,11	7,36	44
	robusta	12,67	0,72	20,73	5,68	62
Ceramica STD	arabica	3,69	0,25	6,04	6,78	33
	arabica	4,26	0,18	6,97	4,23	63
	robusta	/	/	/	/	33
	robusta	5,46	0,45	8,93	8,24	58

Appendice B

Dati particle size distribution

B.1 Macina grigia, Miscela arabica

(In illustrazione 5.1)

0		5		10	
Size [μm]	f	Size [μm]	f	Size [μm]	f
0,55	0,05	0,63	0,05	1,26	0,01
0,63	0,08	0,72	0,07	1,45	0,05
0,72	0,11	0,83	0,08	1,66	0,07
0,83	0,12	0,95	0,09	1,91	0,08
0,95	0,14	1,1	0,1	2,19	0,09
1,1	0,15	1,26	0,11	2,51	0,1
1,26	0,17	1,45	0,12	2,88	0,1
1,45	0,18	1,66	0,13	3,31	0,11
1,66	0,21	1,91	0,15	3,8	0,11
1,91	0,23	2,19	0,16	4,37	0,12
2,19	0,26	2,51	0,17	5,01	0,12
2,51	0,28	2,88	0,18	5,75	0,13
2,88	0,29	3,31	0,19	6,61	0,14
3,31	0,3	3,8	0,2	7,59	0,16
3,8	0,3	4,37	0,2	8,71	0,2
4,37	0,3	5,01	0,21	10	0,25
5,01	0,31	5,75	0,22	11,48	0,34
5,75	0,32	6,61	0,25	13,18	0,46
6,61	0,37	7,59	0,3	15,14	0,62
7,59	0,45	8,71	0,38	17,38	0,81
8,71	0,6	10	0,5	19,95	1,01
10	0,81	11,48	0,67	22,91	1,23
11,48	1,1	13,18	0,9	26,3	1,44
13,18	1,46	15,14	1,2	30,2	1,62
15,14	1,89	17,38	1,54	34,67	1,76
17,38	2,34	19,95	1,91	39,81	1,85

Appendice B

19,95	2,78	22,91	2,28	45,71	1,9
22,91	3,16	26,3	2,62	52,48	1,9
26,3	3,43	30,2	2,89	60,26	1,88
30,2	3,55	34,67	3,06	69,18	1,85
34,67	3,51	39,81	3,12	79,43	1,84
39,81	3,31	45,71	3,06	91,2	1,87
45,71	2,99	52,48	2,89	104,71	1,96
52,48	2,58	60,26	2,64	120,23	2,12
60,26	2,16	69,18	2,35	138,04	2,36
69,18	1,8	79,43	2,08	158,49	2,68
79,43	1,55	91,2	1,87	181,97	3,08
91,2	1,48	104,71	1,76	208,93	3,56
104,71	1,62	120,23	1,79	239,88	4,1
120,23	1,99	138,04	1,99	275,42	4,66
138,04	2,54	158,49	2,37	316,23	5,2
158,49	3,26	181,97	2,89	363,08	5,65
181,97	4,02	208,93	3,53	416,87	5,96
208,93	4,75	239,88	4,2	478,63	6,05
239,88	5,33	275,42	4,84	549,54	5,89
275,42	5,68	316,23	5,35	630,96	5,47
316,23	5,71	363,08	5,65	724,44	4,82
363,08	5,41	416,87	5,68	831,76	4
416,87	4,8	478,63	5,4	954,99	3,12
478,63	3,95	549,54	4,84	1096,48	2,28
549,54	2,95	630,96	4,05	1258,93	1,49
630,96	1,95	724,44	3,12	1445,44	0,76
724,44	0,87	831,76	2,17	1659,59	0,43
831,76	0,06	954,99	1,2	1905,46	0,11
		1096,48	0,27	2187,76	0,02

B.2 Macina grigia, Miscela robusta

(in illustrazione 5.2)

0		5		10	
Size [μm]	f	Size [μm]	f	Size [μm]	f
0,63	0,04	0,72	0,02	1,26	0,04
0,72	0,07	0,83	0,06	1,45	0,07
0,83	0,07	0,95	0,07	1,66	0,07
0,95	0,07	1,1	0,08	1,91	0,08
1,1	0,07	1,26	0,09	2,19	0,09
1,26	0,07	1,45	0,1	2,51	0,1
1,45	0,07	1,66	0,11	2,88	0,11
1,66	0,07	1,91	0,13	3,31	0,11
1,91	0,07	2,19	0,14	3,8	0,12
2,19	0,08	2,51	0,15	4,37	0,12
2,51	0,08	2,88	0,16	5,01	0,13
2,88	0,09	3,31	0,17	5,75	0,13
3,31	0,1	3,8	0,17	6,61	0,15
3,8	0,1	4,37	0,18	7,59	0,18
4,37	0,11	5,01	0,19	8,71	0,23
5,01	0,1	5,75	0,2	10	0,3
5,75	0,1	6,61	0,23	11,48	0,41
6,61	0,1	7,59	0,28	13,18	0,55
7,59	0,11	8,71	0,36	15,14	0,72
8,71	0,14	10	0,47	17,38	0,93
10	0,21	11,48	0,64	19,95	1,15
11,48	0,35	13,18	0,84	22,91	1,37
13,18	0,56	15,14	1,09	26,3	1,57
15,14	0,87	17,38	1,37	30,2	1,72
17,38	1,25	19,95	1,66	34,67	1,82
19,95	1,71	22,91	1,92	39,81	1,86
22,91	2,19	26,3	2,14	45,71	1,85
26,3	2,66	30,2	2,28	52,48	1,79
30,2	3,06	34,67	2,34	60,26	1,7
34,67	3,33	39,81	2,31	69,18	1,62
39,81	3,45	45,71	2,2	79,43	1,56
45,71	3,4	52,48	2,03	91,2	1,55
52,48	3,21	60,26	1,83	104,71	1,58

Appendice B

60,26	2,91	69,18	1,65	120,23	1,69
69,18	2,59	79,43	1,51	138,04	1,85
79,43	2,31	91,2	1,46	158,49	2,1
91,2	2,15	104,71	1,51	181,97	2,41
104,71	2,17	120,23	1,7	208,93	2,82
120,23	2,4	138,04	2,04	239,88	3,29
138,04	2,83	158,49	2,53	275,42	3,83
158,49	3,43	181,97	3,14	316,23	4,39
181,97	4,13	208,93	3,88	363,08	4,95
208,93	4,85	239,88	4,65	416,87	5,42
239,88	5,47	275,42	5,4	478,63	5,76
275,42	5,91	316,23	6,02	549,54	5,88
316,23	6,07	363,08	6,44	630,96	5,76
363,08	5,92	416,87	6,56	724,44	5,4
416,87	5,45	478,63	6,34	831,76	4,83
478,63	4,69	549,54	5,77	954,99	4,12
549,54	3,74	630,96	4,91	1096,48	3,36
630,96	2,7	724,44	3,83	1258,93	2,61
724,44	1,74	831,76	2,69	1445,44	1,89
831,76	0,58	954,99	1,54	1659,59	1,23
		1096,48	0,42	1905,46	0,55
				2187,76	0,1

Bibliografia

- Fayed E. M., Otten L., *Handbook of Powder Science and Technology*, 2nd ed., Chapman & Hall, 1997.
- Masuda H., Higashitani K., Yoshida H., *Powder Technology Handbook*, 3rd ed., Taylor & Francis, 2006.
- Illy A., Viani R., *Il caffè espresso. La scienza della qualità*, EGEA, 2010.
- Mussatto S. I., Machado M. S. E., Martins S., Teixeira J. A., *Production, composition, and application of coffee and its industrial residuals*, Food and Bioprocess Technology, Springer Science, 2011.
- Ireland P. M., *Triboelectrification of particulate flows on surfaces*, Powder Technology, Elsevier, 2009.
- Matsusaka S., Maruyama H., Matsuyama T., Ghadiri M., *Triboelectric charging of powders: A review*, Chemical Engineering Science, Elsevier, 2010.
- Ireland P. M., Nicholson K., *Analysis and comparison of particle tribocarghers*, Minerals Engineering, Elsevier, 2010.

Ringraziamenti