

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Gestionale

Tesi di Laurea Magistrale

**Studio e predisposizione di un piano sperimentale per
l'analisi e l'ottimizzazione dei parametri di processo
nella produzione di caffè in capsule**



Relatori

Prof. Maurizio Galetto

Prof. Gianfranco Genta

Candidato

Ernesto Moncada

Aprile 2019

Sommario

1. Introduzione.....	1
2. Origini, varietà e lavorazione del caffè	2
3. Il processo produttivo	5
3.1. Overview.....	5
3.2. Tostatura	7
3.2.1. Cambiamenti fisici	7
3.2.2. Reazioni chimiche.....	9
3.2.3. Fattori qualitativi nella tostatura	10
3.2.4. Tipologia di tostatrici	12
3.3. Macinatura	14
3.3.1. Curva granulometrica.....	14
3.3.2. Metodi di misurazione della finezza del prodotto.....	17
3.3.3. Macinatura e estrazione.....	18
3.3.4. Strumenti di macinatura industriale	19
3.4. Degassaggio	21
3.5. Confezionamento	23
3.5.1. Shelf life del caffè	23
3.5.2. Packaging	24
3.6. Percolazione.....	25
3.6.1. Parametri che influenzano la percolazione.....	26
4. Design of Experiment (DoE).....	29
4.1. Principi della sperimentazione.....	30
4.2. Schema di pianificazione degli esperimenti	31
4.3. Piano sperimentale: Miglioramento caffè in capsule.....	32
4.3.1. Formulazione del problema.....	32

4.3.2. Fattori e livelli	33
4.3.3. Variabili di risposta	37
4.3.4. Scelta del piano sperimentale	38
4.3.5. Ipotesi di lavoro e assunzioni	39
4.3.6. Stabilimento pilota	40
4.3.7. Metodi e strumenti	41
4.3.8. Esecuzione prove sperimentali	48
4.3.8. Aggiustamenti in corso d'opera e prove preliminari.....	59
4.3.9. Gestione del progetto	59
4.3.10. Analisi dei dati	60
4.3.11. Discussione dei risultati	68
4.3.12. Sviluppi futuri	78
4.4. Piano sperimentale: Degassaggio caffè macinato.....	79
4.4.1. Formulazione del problema.....	79
4.4.2. Fattori e livelli	80
4.4.3. Variabili di risposta	82
4.4.4. Metodi e strumenti	83
4.4.5. Sviluppi futuri	86
5. Conclusioni.....	87
Bibliografia.....	89
Ringraziamenti	91

1. Introduzione

Alla base del presente studio vi è la necessità di progettare un piano sperimentale atto al miglioramento del processo di produzione del caffè in capsule e della conseguente ottimizzazione dei principali fattori produttivi.

Il disegno del suddetto piano nasce dall'esigenza dell'azienda Luigi Lavazza S.p.A. di avere una metodologia di sperimentazione e di analisi che riesca a caratterizzare il processo quantificando l'effetto delle diverse variabili in gioco e, conseguentemente, determinare le ottimali configurazioni dei diversi fattori di processo al fine di ottenere un miglioramento della qualità in tazza di caffè in capsule.

Il seguente lavoro descrive, in una prima parte, tutte le fasi del sistema produttivo presenti in un'industria di caffè provando ad analizzare tutti gli aspetti senza, tuttavia, entrare nel merito dei diversi dettagli che caratterizzano il processo.

L'obiettivo dei primi capitoli è quello di descrivere le origini e le diverse lavorazioni della materia prima per poi esporre le diverse fasi della catena produttiva quali tostatura, macinatura, degassaggio e confezionamento e come, in modo differente, questi siano in grado di influenzare la qualità e la resa del prodotto finito.

Lo studio procede entrando nel merito della sperimentazione esponendo, innanzitutto, i principi fondamentali su cui si basa e dovrebbe attenersi un corretto piano sperimentale per poi descrivere le diverse variabili considerate e i rispettivi livelli del processo da analizzare.

All'interno dei capitoli relativi vengono descritti nel dettaglio i diversi metodi, strumenti e impianti utilizzati durante l'esecuzione delle prove, le modalità di gestione del progetto e le diverse ipotesi di lavoro e assunzioni da prendere in considerazione.

Il lavoro si chiude con un capitolo dedicato all'analisi dell'intero piano sperimentale evidenziando la metodologia applicata, i risultati ottenuti e i relativi commenti. Parte dell'analisi è, invece, da rimandare a lavoro futuro.

Un secondo piano sperimentale, in fase di progettazione, incentrato sul processo di degassaggio di caffè macinato, è descritto negli ultimi paragrafi. In questo caso la strumentazione è ancora in fase di validazione e l'esecuzione delle prove è rimandata anch'essa a lavoro futuro.

È da precisare come per motivi di segretezza industriale l'azienda Luigi Lavazza S.p.A. è incline a celare alcuni parametri di progettazione e parte dei risultati finali ottenuti.

2. Origini, varietà e lavorazione del caffè

L'origine, la botanica e gli aspetti genetici del caffè sono ben descritti in molte pubblicazioni. È utile, tuttavia, fornire una panoramica generale a riguardo delle principali varietà di caffè, della loro distribuzione geografica e della loro diversa qualità.

La produzione commerciale di caffè si basa, principalmente, su due specie botaniche differenti: caffè Arabica e caffè Robusta.

Tutte le specie di caffè hanno origine nell'Africa tropicale (Bridson e Verdcourt, 1988). Nelle foreste equatoriali, dalla Guinea all'Uganda, sono presenti diverse forme spontanee di varietà Robusta, mentre le popolazioni naturali di caffè Arabica sono limitate alle foreste dell'Etiopia sudoccidentale (Bertaud e Charrier, 1988).

La storia della diffusione della varietà Arabica inizia nell'800 quando alcuni semi vengono trasportati dall'Etiopia allo Yemen dove sono coltivati fino alla fine del quattordicesimo secolo. Successivamente la specie continua la sua espansione in altre regioni quali India, Sri Lanka e Indonesia dove cominciano le prime piantagioni a scopo commerciale.

Durante il diciassettesimo secolo il caffè arriva in Europa, prima in Olanda e successivamente in Francia fino a raggiungere diverse regioni intertropicali nel mondo.

La diffusione della specie Robusta ha, invece, una storia più recente che inizia in Africa centrale. Inizialmente la varietà viene introdotta in Indonesia e, successivamente si stabiliscono piantagioni in India, Uganda e Costa d'Avorio.

Entrambe le varietà sono oggi diffuse in tutto il mondo: la specie Arabica è coltivata in Centro e Sud America, in Africa Centrale e Orientale, in India e in Indonesia, mentre la specie Robusta è coltivata principalmente in Africa Centrale e Occidentale e in tutto il sud-est asiatico (Folmer, 2017).

In virtù delle migliori caratteristiche organolettiche della bevanda da essa ottenuta, la varietà Arabica sarebbe stata senz'altro la sola specie coltivata se non fosse stata vulnerabile in una certa misura a diverse malattie (Illy e Viani, 1995).

L'Arabica viene valutata a un prezzo superiore sul mercato commerciale, è più delicata, richiede maggiore cura in fase di coltura e possiede caratteristiche organolettiche superiori a confronto con la Robusta che, pur essendo più resistente, restituisce una bevanda con un'inferiore qualità organolettica e resa in tazza.

Oggi circa la maggior parte della produzione totale di caffè proviene da varietà Arabica. (84.3 milioni di sacchi da 60 Kg nel 2014/2015¹).



Figura 1 - Differenze tra varietà Arabica e Robusta.

I programmi di sviluppo e coltivazione non sono solamente focalizzati sulla produttività, ma anche sullo sviluppo di una maggiore tolleranza a parassiti e malattie, un migliore adattamento a cambiamenti climatici e, dove possibile, sul differenziamento di attributi sensoriali.

Il raccolto dei frutti dal ramo può iniziare solamente dopo un esame accurato del livello di maturazione.

Una volta che il raccolto è stato ultimato ha inizio, nello stesso giorno, l'essiccazione che può avvenire secondo metodi differenti, ma solamente dopo che sono state eliminate impurità e corpi estranei e dopo che le ciliegie siano state separate per densità in modo da avere lotti omogenei.

La lavorazione naturale del caffè prevede che le ciliegie intere vengano essiccate con esposizione al sole. Una volta terminata l'essiccazione, tramite ausilio di macchinari, viene rimossa la polpa. È un metodo diffuso nelle regioni tropicali nelle quali la stagione secca coincide col periodo di raccolta.

Circa il 90% di caffè Arabica prodotto in Brasile viene processato in questo modo e la maggior parte delle tipologie di caffè Robusta sono ottenute con questo metodo (Coffee Sapiens, 2018).

La lavorazione a lavaggio, o in umido, è una metodologia diffusa in regioni caratterizzata da elevata piovosità e risorse idriche disponibili. Richiede innanzitutto lo spollamento che avviene in acqua. Una volta conclusa questa prima fase i chicchi subiscono la fase di fermentazione biologica controllata in acqua per 12-36 ore in modo da eliminare qualunque

¹ ICO Statistics

traccia di mucillagine e polpa residua (Illy e Viani, 1995). Al termine della fermentazione il caffè viene infine lavato e lasciato essiccare come nel metodo naturale o, in alternativa, tramite appositi macchinari.

Molti paesi produttori noti tradizionalmente per l'acidità dei propri caffè utilizzano tale metodo per far sì che la caratteristica si conservi e si esprima al meglio.



Figura 2 - Essiccazione al naturale (a sinistra) e fase di fermentazione in acqua di caffè lavato (a destra).

La differenza principale tra caffè naturale e lavato si riscontra nel contenuto di solidi solubili che è maggiore nel caffè naturale. La diversità può essere ricondotta al fatto che tramite lavorazione in umido si ottiene una perdita di solidi solubili sia in fase di fermentazione che in fase di lavaggio (Wootton, 1971).

La lavorazione naturale, consente, tuttavia, di produrre un buon caffè con corpo e aroma piacevoli e bassa acidità, molto apprezzati nella preparazione dell'espresso.

3. Il processo produttivo

3.1. Overview

Il processo produttivo che porta alla realizzazione di prodotto finito quale caffè macinato in pacchi sottovuoto, capsule o confezioni in grani è un sistema che vede in gioco diversi parametri che contribuiscono in modo più o meno significativo sul risultato finale.

Una volta raggiunto lo stabilimento, all'interno di sacchi da 60 Kg o all'interno di apposite cisterne, avviene, dopo un rigido controllo di qualità, la fase di pulitura durante la quale vengono rimossi dai lotti eventuali corpi estranei presenti. Successivamente il caffè verde viene inserito all'interno di silos di stoccaggio temporaneo.

Il passaggio alla prima fase del processo produttivo, ovvero la tostatura, avviene solamente dopo aver definito la miscela da utilizzare. Durante la fase di tostatura le diverse origini vengono così miscelate tra di loro grazie ai moti convettivi all'interno della macchina tostatrice.

Una volta terminata la fase di tostatura, il cui periodo può variare in base alle origini del caffè crudo, in base al colore più o meno scuro da ottenere e, di conseguenza alle qualità aromatiche desiderate, il caffè tostato viene stoccato per un certo periodo di tempo (curing time) per essere successivamente macinato o trasferito direttamente al confezionamento come caffè in grani.

Al termine della tostatura, il caffè, a causa delle diverse trasformazioni fisiche e chimiche che subisce, continua a degassare, liberando anidride carbonica e composti aromatici nell'aria.

Nel caso in cui venga trasferito direttamente al confezionamento, nelle apposite confezioni è inserita una valvola unidirezionale che consente al caffè di continuare a degassare evitando, così, il rigonfiamento e la conseguente perdita di integrità del pacchetto. Nel caso in cui sia destinato alla macinatura, esso viene invece fatto stanziare in delle apposite celle di degassaggio nelle quali, tramite inserimento di azoto, il quale si comporta da gas inerte che evita al caffè di entrare in contatto con l'ossigeno e quindi di ossidarsi, continua la fuoriuscita di anidride carbonica e altri gas.

Tale processo è necessario e fondamentale per il caffè macinato in quanto minore è la dimensione della polvere, più rapida è la liberazione di gas nell'aria. Non viene seguito per il caffè in grani il quale ha un tempo di degassaggio molto più lungo e, per tale motivo, viene fatto degassare all'interno del pacchetto.

Nel caso in cui il caffè sia destinato a confezioni sottovuoto tale processo ha una durata di qualche ora. Per le capsule, invece, il processo di degassaggio può avere una durata superiore alle 24 ore a causa del limitato spazio di testa.

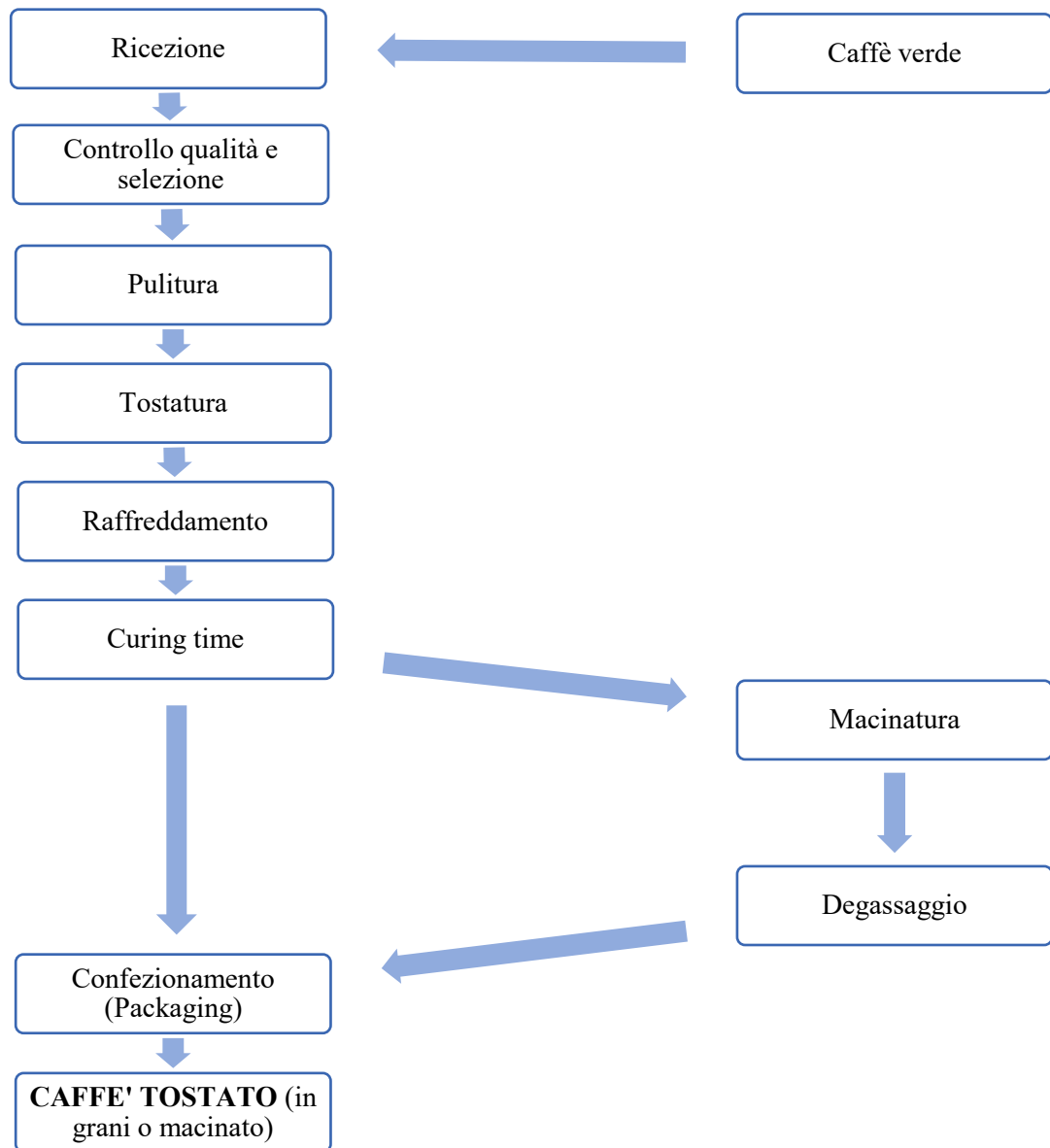


Figura 3 - Fase di processo di produzione industriale di caffè.

Una volta terminata la fase di confezionamento, un controllo di qualità viene effettuato per determinare lotti non conformi o idonei allo stoccaggio come prodotti finiti.

3.2. Tostatura

La tostatura rappresenta la prima fase del processo produttivo e ha una durata che varia dai 3 ai 20 minuti a seconda del ciclo e della tostatrice utilizzati (Folmer B., 2017). Esso rappresenta il processo principale di tutti i sistemi produttivi di caffè in quanto è l'operazione di trasformazione di caffè verde durante la quale vengono definite le principali caratteristiche organolettiche.

Il processo di tostatura incrementa il valore del prodotto fino al 300% rispetto al valore della materia prima non processata (Yeritzian et al., 2002).

Questa fase permette, una volta raggiunta una determinata temperatura, di conferire alla miscela la sua tipicità in termini di colore, forma, volume, massa, umidità e densità. In questa fase si formano, inoltre, sostanze che saranno poi responsabili del gusto e dell'aroma.

La fase di tostatura è un processo termico tradizionale, durante il quale avviene l'asciugatura dei grani, l'acqua viene redistribuita e avvengono delle reazioni chimiche complesse come la reazione di Maillard e la pirolisi (Clarke e Macrae 1985; Illy e Viani 1995).

3.2.1. Cambiamenti fisici

Le principali reazioni e modificazioni di natura strutturale possono essere sintetizzate in tal modo:

- Temperatura dei chicchi;
- Disidratazione;
- Perdita di peso;
- Migrazione degli oli verso la superficie esterna;
- Cambi nella colorazione del chicco;
- Aumento volumetrico dei grani;
- Variazione della struttura interna del chicco;
- Resistenza alla pressione.

Per fare in modo che si sviluppino le caratteristiche desiderabili è necessario che il chicco superi la temperatura di 190°C per un certo periodo di tempo prima di interrompere il processo. La temperatura dei chicchi si aggirerà intorno ai 200-250°C al termine della tostatura (Folmer B., 2017).

La disidratazione consiste nella perdita di acqua del chicco durante la fase di tostatura rappresentato da una diminuzione del contenuto di umidità dall'8-12% a valori prossimi all'1% (illy e Viani, 1998). Il risultato dipende, ovviamente, dalla tipologia di processo

impiegato in termini di tempo-temperatura di tostatura e dalle condizioni di raffreddamento ad aria o tramite quenching con acqua.

La perdita di acqua e massa organica fa in modo che i grani disperdano grandi quantità di gas a causa di un'alta pressione interna. La formazione del colore e delle proprietà aromatiche è accompagnata da un alto incremento di volume dei grani e da un particolare cambiamento dell'infrastruttura caratterizzato anche da un'alterazione della porosità delle pareti cellulari (Saleeb, 1975; Puhmann, 1986; Massini, 1990; Gutiérrez, 1993; Illy e Viani 1995; Wilson 1997).

Complessivamente, la perdita di peso finale si aggira fra il 12 e il 25% a seconda delle modalità di tostatura ed è dovuta anche alla perdita di prodotti di reazione come ad esempio l'anidride carbonica (Wang N., 2012).

Il caffè verde è costituito per circa il 18% da lipidi. La tostatura non modifica il contenuto di lipidi all'interno nel chicco. Tuttavia, i cambiamenti della struttura cellulare interna mobilizzano i lipidi che vengono spinti verso la superficie del chicco (Schenker, 2000).

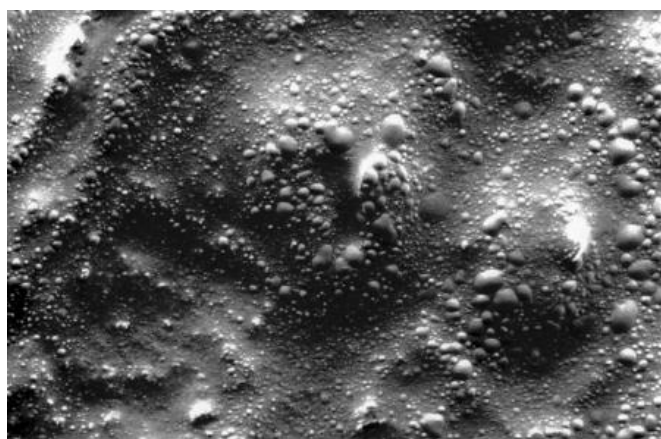


Figura 4 - Foto al microscopio di chicco di caffè tostato. Visibile la migrazione degli oli verso la superficie. Immagine: B.Frey e S.Handschin.

Il processo di tostatura è, a causa delle reazioni di Maillard e della pirolisi, responsabile della definizione del colore del caffè in grani (Hernandez et al., 2007), il quale fornisce una prima visibile indicazione sul grado di tostatura. Il cambiamento del colore risulta strettamente collegato con lo sviluppo dell'aroma del caffè e, per questo motivo, è un primo indicatore di qualità.

Per ottenere dei risultati affidabili e, soprattutto, per definire una scala di colore questo viene misurato tramite strumenti ottici commerciali.

La struttura interna del caffè verde in entrata nella tostatrice è compatta e densa e la tostatura porta a un graduale aumento della porosità interna e conseguente incremento di volume dei chicchi causata dalla continua espansione dei gas con l'aumentare della temperatura (Shenker et al., 2000). L'aumento volumetrico può essere del 50-80% rispetto al volume di entrata nella tostatrice. A parità di temperatura, il caffè appartenente alla varietà arabica aumenta maggiormente in volume rispetto alla robusta.

L'incremento di volume dei chicchi e lo sviluppo di pori durante la tostatura sono altamente dipendenti dalle condizioni e dai parametri del processo stesso (Ortolà 1998). L'obiettivo è, infatti, la scelta di appropriate condizioni di tostatura per ottenere la microstruttura dei grani che possa fornire al caffè la qualità desiderata.



Figura 5 - Differenze in termini volumetrici tra caffè verde e caffè tostato. Immagine: Coffee Sapiens.

Una conseguenza delle diverse modifiche nella struttura fisica, maggiormente porosa e fragile, è una minore resistenza alla pressione.

3.2.2. Reazioni chimiche

L'aumento della temperatura durante la fase di tostatura è causa di una serie di reazioni chimiche che modificano in modo sostanziale la composizione del chicco.

Le principali reazioni chimiche sono rappresentate da:

- Idrolisi;
- Pirolisi;
- Formazione di gas;
- Formazione di composti aromatici;
- Reazione di Maillard;

L'idrolisi è una reazione chimica prodotta dall'acqua e, durante la fase di tostatura questa porta alla creazione di zuccheri a oligosaccaridi.

La pirolisi consiste nella decomposizione di un composto per via termica tramite calore. Questa reazione diventa determinante negli ultimi minuti di tostatura nel conferimento al caffè tostato di composti che definiscono le caratteristiche organolettiche.

La tostatura porta, inoltre, a formazione di gas in notevoli quantità. Una parte di questi sono rilasciati nell'atmosfera durante il processo, ma la restante parte rimane all'interno del chicco e verrà poi rilasciata durante la fase di degassaggio o liberata durante la macinatura.

Specifiche condizioni di tostatura determinano reazioni chimiche che portano alla formazione di composti aromatici. L'aroma non viene liberato nelle prime fasi del processo di tostatura (Schenker, 2002) che risulta comunque importante per la formazione di precursori dell'aroma.

La reazione di Maillard è rappresentata da un insieme di fenomeni fisici e chimici che attribuiscono al prodotto odore e colore durante la cottura. Molti cambiamenti che avvengono durante la tostatura del caffè sono associati a questo tipo di trasformazioni che conferiscono l'aroma tipico del caffè tostato.

3.2.3. Fattori qualitativi nella tostatura

La tostatura è quindi una fase fondamentale nel determinare la qualità in tazza. In linea generale, le tostature scure tendono a migliorare caratteristiche come la corposità a discapito di note aromatiche più fini mentre le tostature chiare enfatizzano le note acide.

Tra i fattori influenti è utile riconoscere il profilo di tostatura che è il risultato della definizione dei parametri e dei controlli effettuati durante le varie tappe del processo.

È fondamentale, infatti, definire e controllare parametri quali tempo, temperatura della camera di tostatura e temperatura del chicco durante le diverse fasi (www.anacafe.org).

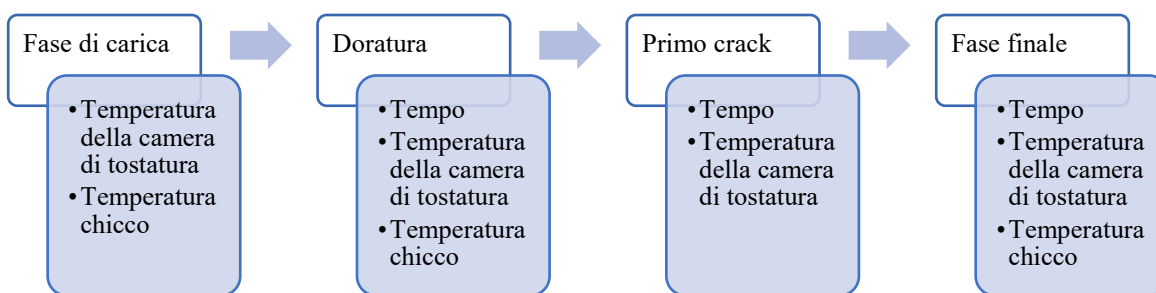


Figura 6 - Sequenza di fasi del processo di tostatura e parametri influenti.

Il livello di tostatura va scelto in relazione alla tipologia di chicchi utilizzati e alle preferenze organolettiche.

Durante il processo di tostatura il caffè viene inserito all'interno della tostatrice una volta che è stata definita la temperatura della camera. La temperatura della tostatrice subisce, successivamente, un calo in modo complementare a quella del caffè che subisce ovviamente un innalzamento.

Durante il processo avviene un aumento della temperatura sia della camera di tostatura sia dei grani fino a raggiungere un determinato grado di tostatura desiderato e conseguenti caratteristiche del prodotto.

Raggiunta una determinata temperatura, l'accumulo della pressione dell'acqua, insieme alla grande quantità di gas sviluppati, causa la rottura delle pareti cellulari ("primo crack"). Con l'aumentare della temperatura la pressione causata dall'accumulo di anidride carbonica supera la forza delle pareti cellulari causando il cosiddetto "secondo crack". Al termine della tostatura, i chicchi di caffè vengono raffreddati a temperatura ambiente (Yeretzian et al., 2002).

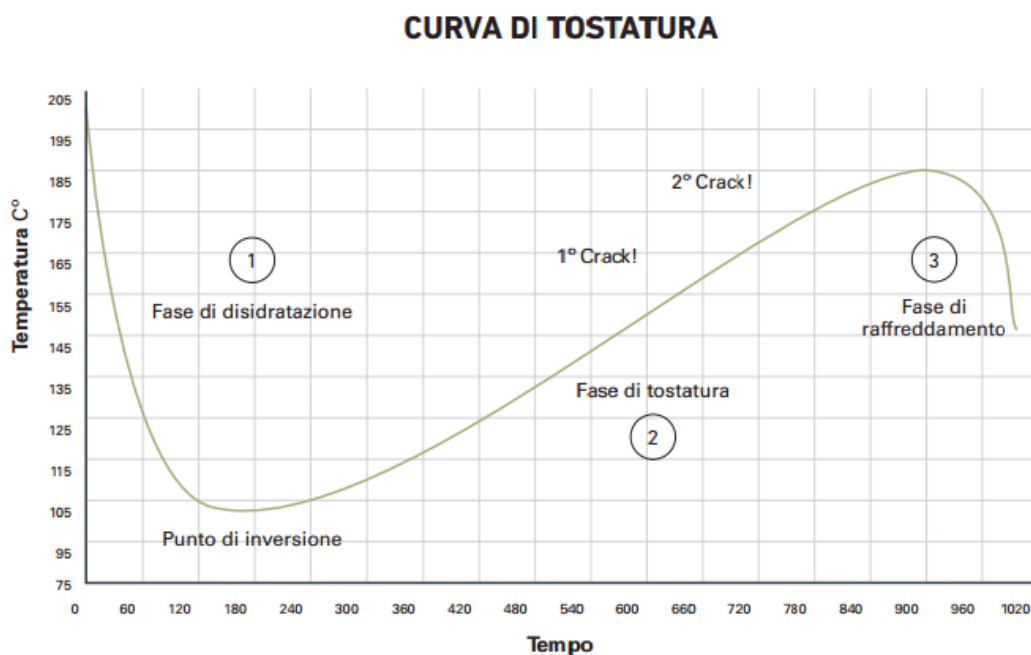


Figura 7 - Esempio di curva di tostatura. Il punto di inversione rappresenta il momento in cui la temperatura comincia nuovamente ad aumentare. Immagine: Coffee Sapiens.

Il parametro più influente è rappresentato dal grado di tostatura che risulta determinante nella definizione dell'intensità del gusto e dell'aroma del caffè.

Il tempo di tostatura fa in modo che a parità di grado di tostatura i chicchi di caffè possano avere diverse caratteristiche fisiche e organolettiche. Ad esempio, chicchi tostati più lentamente e a minore temperatura presentano solitamente densità più elevate in quanto si

verifica, a tali condizioni, un minor incremento del volume totale dei pori rispetto ai campioni tostati più velocemente e ad alta temperatura.

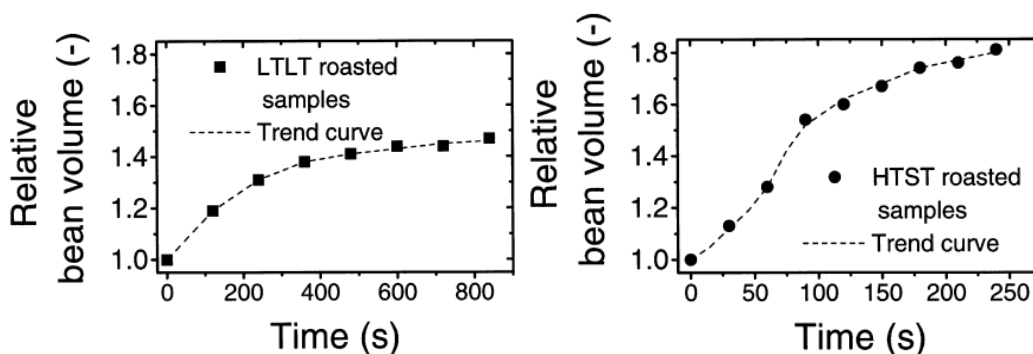


Figura 8 - Differenze, in termini di volume, tra chicchi tostati a bassa temperatura (Low Temperature Long Time) (a sinistra) e ad alta temperatura con processo più rapido (High Temperature Short Time) (a destra). Immagine: B.Folmer.

Allo stesso grado di tostatura, infatti, le condizioni e i parametri del processo hanno un maggior impatto sulle proprietà strutturali del prodotto. I grani tostati ad alta temperatura e, quindi, minor tempo, mostrano un maggior volume, un volume cumulato di pori maggiore e micro-pori più larghi rispetto ai grani tostati a bassa temperatura (Wang N., 2012).

Diversi studi si sono dedicati all'identificazione di quei composti che hanno un maggiore impatto sull'aroma del caffè (Grosch, 2001; Poisson 2014). La formazione dei composti aromatici è determinata, oltre che dalle specifiche condizioni delle reazioni chimiche (temperatura, attività dell'acqua ecc.), anche dai parametri di processo come ad esempio il trasferimento di calore nel tempo. Perciò, diverse condizioni di tostatura, possono dare diverse proprietà aromatiche alla stessa varietà di caffè.

Particolare è anche la definizione di un certo bilanciamento tra acidità e amaro. Incrementando il grado di tostatura l'acidità diminuisce a favore del gusto amaro. Per questo è importante definire i parametri di processo ottimali. La caffeina, che ha caratterizza il gusto amaro del caffè, è responsabile solamente del 10-20% dell'amaro percepito nel caffè in quanto le sostanze maggiormente responsabili si formano, appunto, durante la tostatura.

3.2.4. Tipologia di tostatrici

A seconda delle necessità e dei risultati desiderati la fase di tostatura può avvenire in differenti modi anche se generalmente si distinguono due macro-categorie.

Tostatrici a conduzione

In sistemi di questo tipo il trasferimento di calore avviene per contatto con le superfici riscaldate. Tale metodologia è tipica delle tostatrici a tamburo.

Il prodotto torrefatto tramite tostatrice a tamburo che comporta quindi trasferimento di calore per conduzione è caratterizzato dalla presenza di minori composti solubili, da un aroma più rotondo e intenso e una maggiore perdita di composti volatili (Nagaraju et al., 1997).

Tostatrici a convezione

In questo caso la propagazione di calore avviene attraverso flusso di aria causato dalla movimentazione molecolare. La stessa quantità di calore può essere trasferita ai grani usando una piccola quantità di aria ad alta temperatura o usando, in alternativa, una maggiore quantità di aria a bassa temperatura, ottenendo, ovviamente, dei risultati differenti di tostatura.

Nonostante le diverse tipologie, quella a convezione risulta la modalità di trasferimento di calore più importante in quanto garantisce un certo tasso di uniformità della tostatura (Baggenstoss et al., 2008) oltre a restituire, generalmente, un prodotto caratterizzato da una minore densità e alto rendimento (Eggers e Pietsch, 2001).

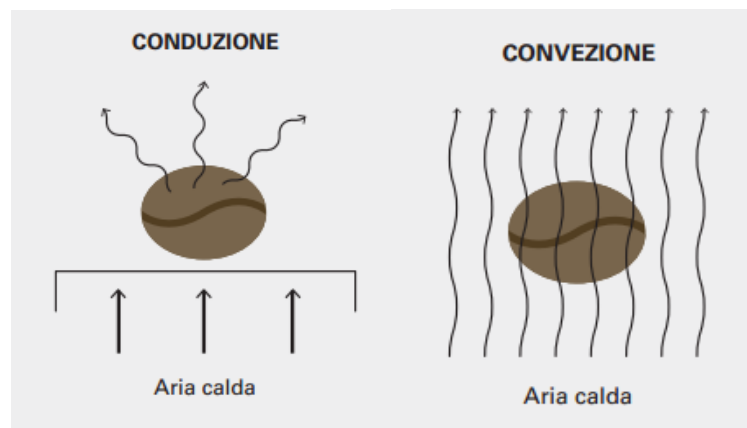


Figura 9 - Trasferimento di calore per conduzione (tostatrici a tamburo) e per convezione (tostatrici ad aria). Immagine: Coffee Sapiens.

La maggior parte delle macchine tostatrici sono equipaggiate con uno strumento utile alla cosiddetta fase di quenching. Una volta che i grani raggiungono la loro temperatura finale, durante il processo avviene una fase di preraffreddamento tramite una quantità ben definita di acqua fredda. L'acqua evapora sulla superficie dei grani raffreddando il caffè. Una moderata quantità di acqua durante il quenching ha effetti limitati sulle proprietà aromatiche del caffè.

3.3. Macinatura

Affinché il caffè possa essere consumato come alimento, è necessario distruggere la forma naturale del seme e trasformarlo, in tal modo, in polvere.

La macinatura risulta, pertanto, una variabile fondamentale nella preparazione del caffè. L'obiettivo principale del processo di macinatura è quello di aumentare la superficie di estrazione, cioè di aumentare l'estensione dell'interfaccia tra acqua e solido, al fine di facilitare il trasferimento di sostanze solubili nella bevanda.

In ottica relativa a un'estrazione ottimale, quindi, va prestata molta attenzione alla fase di macinatura che, tramite l'impostazione di diversi parametri, influisce in modo più o meno significativo sul processo di estrazione.

Per ottenere caffè macinato è necessario produrre fratture applicando un insieme di forze. Lo sforzo esercitato sul caffè in grani può essere di due tipi: sforzo di compressione e sforzo di taglio. Entrambi producono deformazioni che possono seguire leggi semplici, come la legge di Hooke² oppure leggi più complesse. Una frattura si verifica quando lo sforzo supera il limite posto dalla legge di Hooke, quando raggiunge, quindi, il carico di rottura (Pittia e Lerici, 2001).

Lo sforzo, ovviamente, non è distribuito in modo uniforme all'interno dei grani in quanto quest'ultimo mostra sempre leggere discontinuità o punti di debolezza. Le linee di forza si concentrano lungo il bordo delle discontinuità causando fratture locali che si propagano rapidamente (Illy e Viani, 1995).

3.3.1. Curva granulometrica

L'uso di metodi analitici per la misurazione granulometrica permette di tracciare le curve granulometriche ottenendo un vero e proprio profilo di macinatura del caffè (Domaschi A. 2012).

La distribuzione della dimensione delle particelle può essere descritta tramite il valore di alcune caratteristiche tra cui X10, X50 e X90 che indicano rispettivamente la dimensione del 10% delle particelle, del 50% e del 90%. La distribuzione di probabilità è di tipo bimodale: X50 indica la mediana di tale distribuzione ed è definita a priori. Il 50% di

² $\epsilon = \sigma E$, dove ϵ rappresenta la deformazione generata dallo sforzo σ , e E rappresenta il modulo di elasticità o di Young.

particelle avranno, quindi, un diametro inferiore al valore X50 definito. La percentuale di polveri presenti è invece rappresentata dall'area del grafico tra 0 e 100 μm .

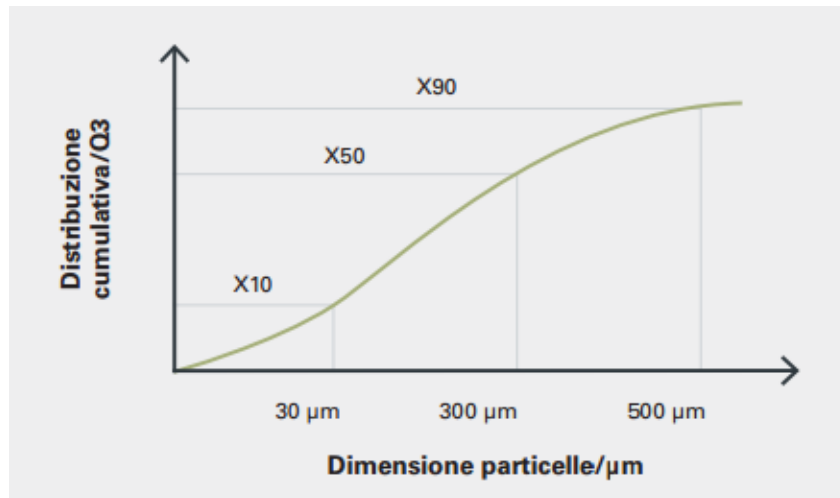


Figura 10 - Curva cumulativa dalla quale è possibile ricavare la percentuale di particelle che ha dimensioni pari o inferiori al valore corrispondente delle ascisse. Immagine: Coffee Sapiens.

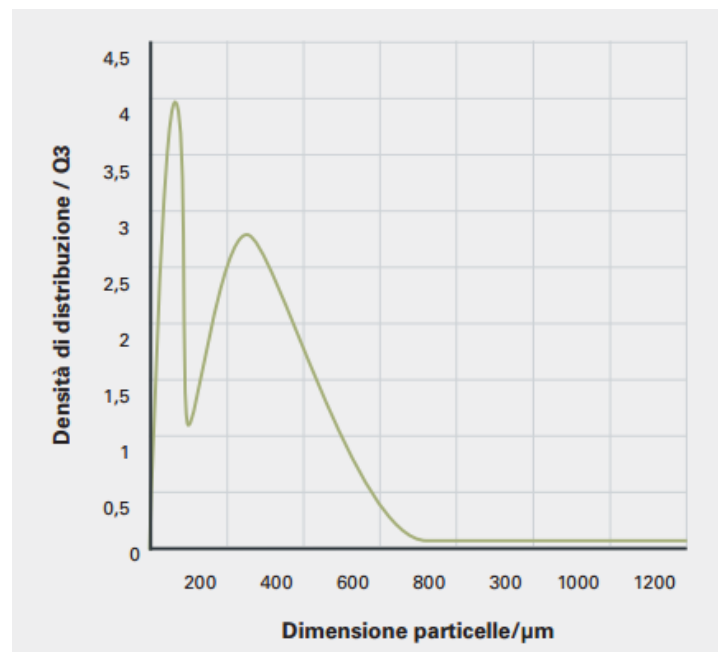


Figura 11 - Derivando la curva granulometrica si ottiene la densità di distribuzione. La percentuale di polvere corrisponde all'integrale della curva da 0 a 100 μm . Immagine: Coffee Sapiens.

Le caratteristiche delle distribuzioni bimodali relative alla dimensione delle particelle non possono essere attribuite solamente alla tecnica di macinatura utilizzata, ma anche alla struttura fisica del prodotto (Petracco e Marega, 1991).

Tra le variabili che influenzano il risultato di macinatura vi è sicuramente la composizione del caffè da macinare. La macinazione, come già descritto, è esercitata su chicchi di caffè

che non solo provengono da diverse varietà botaniche e differenti climi, ma sono stati anche lavorati ed essiccati con metodi tra di loro differenti.

In base al grado di tostatura e dalla velocità con la quale tale processo avviene il chicco di caffè può subire un'espansione più o meno notevole grazie alle diverse reazioni di pirolisi che avvengono ad una certa temperatura e che contribuiscono anche alla formazione di gas e aromi volatili. Tale espansione influenza l'elasticità delle pareti cellulari che perdono resistenza oltre a diventare friabili.

L'utilizzo del raffreddamento ad acqua tramite il cosiddetto quenching provoca, a differenza del raffreddamento ad aria, la rottura delle pareti cellulari a causa del brusco calo di temperatura subito dal caffè. Inoltre, la distribuzione dell'umidità nei chicchi di caffè risulta fondamentale per una omogenea macinatura e durante il quenching parte dell'acqua utilizzata è assorbita dal caffè. L'acqua utilizzata per il quenching non viene distribuita immediatamente in modo omogeneo, ma inizialmente è presente solo sulla superficie del caffè tostato (Fischer, 2005): fondamentale è un certo periodo di attesa tra la tostatura e la macinatura (curing time) per permettere una uniforme distribuzione dell'umidità all'interno dei chicchi.

Le variabili che influenzano la distribuzione delle polveri di caffè macinato appartengono anche, ovviamente, al tipo di macchinario utilizzato per la macinatura e, di conseguenza, ai relativi parametri, ad esempio, alla distanza tra i rulli o al meccanismo di alimentazione della macchina stessa.

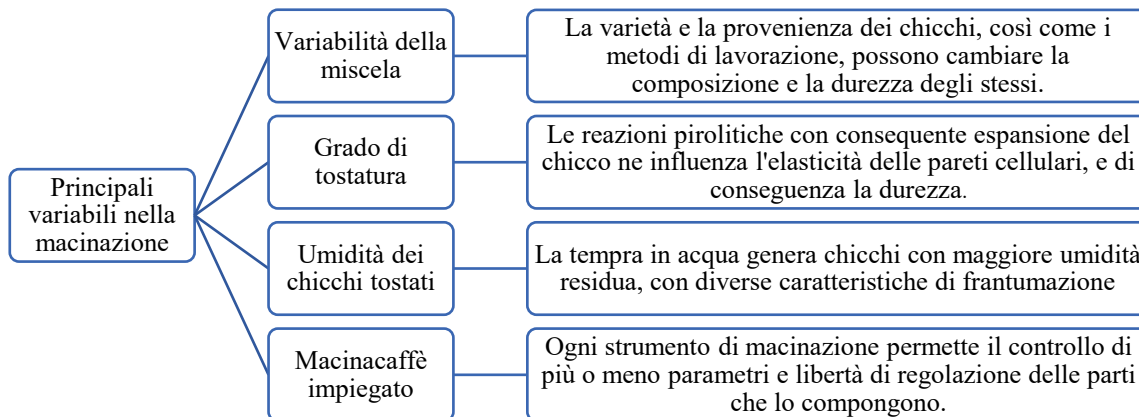


Figura 12 - Variabili di macinatura e conseguente effetto.

3.3.2. Metodi di misurazione della finezza del prodotto

Un metodo pratico per controllare la finezza del caffè macinato riguarda l'estrazione di una singola porzione di caffè in polvere e utilizzarlo per la preparazione di una tazza di caffè. La quantità di liquido percolato in un dato tempo viene usata come grandezza da misurare per regolare la variabile primaria del macinino. Tale metodo permette sicuramente un riscontro immediato e una comprensione intuitiva del rapporto causa-effetto.

Per svincolare, però, la valutazione della macinazione da un test di percolazione, è necessario l'utilizzo di metodi che possano essere applicati direttamente alla polvere di caffè.

Setacciatura

Viene utilizzata una pila di setacci ordinati secondo dimensione di maglie crescente. Una definita quantità di caffè è lasciata cadere, per gravità e vibrazioni, attraverso i vari setacci. Se necessario, un getto di aria può aiutare a evitare agglomerati di particelle. In base alla loro diversa dimensione, ciascuna particella può adagiarsi su un setaccio piuttosto che un altro. In tal modo è possibile risalire alla distribuzione di densità verificando la percentuale di massa rispetto alla massa totale che si è depositata sul setaccio con crivelli di una certa dimensione.

Tale metodo risulta difficilmente ripetibile a causa del quantitativo di olio che è presente sulla superficie della polvere a seguito della macinatura. L'olio agisce da adesivo tra le

particelle formando degli aggregati che non passano attraverso le maglie dei setacci. Inoltre, le particelle che attraversano un setaccio possono unirsi ad altri aggregati nei setacci successivi (Folmer, 2017).

Diagnostica per immagini

È un metodo più complicato che si realizza posizionando il prodotto macinato su un vetrino reticolato per determinare la dimensione delle particelle.

Utilizzo di metodi ottici

Si tratta di particolari strumenti in grado di disperdere caffè macinato in un flusso d'aria. In caso di diffrazione laser, il caffè attraversa un fascio laser che viene successivamente diffuso. Il modello di diffrazione viene rilevato e calcolato e successivamente viene calcolato il diametro che dovrebbero avere le particelle per restituire lo stesso modello. L'elaborazione di queste informazioni produce un grafico che associa le gamme di dimensione con la concentrazione di particelle contenuta in quella gamma specifica.

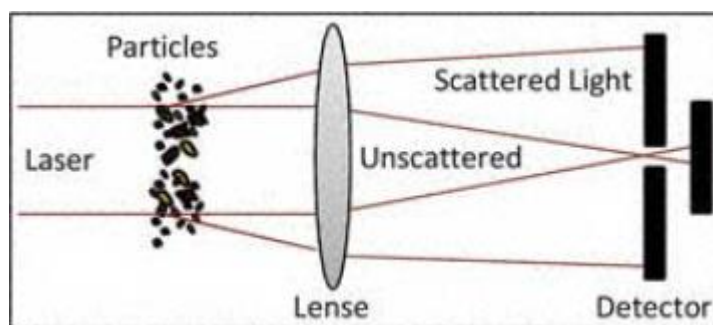


Figura 13 - Schema diffrattometro laser per misurazione dimensioni particelle. Immagine: B.Folmer.

3.3.3. Macinatura e estrazione

La capacità estrattiva è dipendente dalla superficie totale delle particelle del caffè ed è strettamente correlata alla dimensione delle stesse. Le diverse granulometrie sono, infatti, associate a diverse estrazioni e un tasso alto di estrazione non è, però, adatto ad ogni tipo di preparazione.

La presenza di polveri mette a rischio la consistenza dell'estrazione bloccando il percorso dell'acqua. Tuttavia, per quanto riguarda il caffè espresso sarebbe necessario mantenere comunque una certa percentuale di polveri in quanto bisogna ottenere un accumulo di pressione e la formazione della crema nonostante il breve tempo di estrazione (Folmer, 2017). Le particelle fini rilasciano più velocemente le sostanze solubili e portano, infatti, a prodotto finale più intenso e concentrato in tazza (Coffee Sapiens, 2018), ma possono portare anche a una bevanda sovra-estratta dove i composti aromatici vengono estratti oltre misura.

La percolazione dell'espresso trae beneficio da questa distribuzione bimodale delle dimensioni delle particelle, comprendente particelle fini, che aumentano la superficie esposta di estrazione insieme a quelle meno fini, che garantiscono il flusso dell'acqua (Illy e Viani, 1995)

Ogni processo di macinatura si pone l'obiettivo di dare delle definite caratteristiche alle particelle in relazione al metodo di preparazione del caffè. Ad esempio, per le estrazioni filtro, al contrario del tipico espresso, ad oggi, viene trattato con un processo di macinatura che dà come risultato una dimensione maggiore delle particelle che non lascia sedimenti in tazza e nessuna percezione di polveri da parte del consumatore, ma che consente una percolazione più rapida e a bassa pressione. Tuttavia, un'erogazione di questo tipo può portare a una bevanda sotto-estratta che presenta in tazza solo le sostanze maggiormente solubili e che mitiga il gusto e l'aroma.

Un risultato granulometrico idoneo all'elaborazione finale si traduce in un equilibrio tra gusti e aromi sotto-estratti, estratti e sovra-estratti (Felbinger R. 2016).

3.3.4. Strumenti di macinatura industriale

Sono diverse le tecniche utilizzate per la macinatura del caffè in grani. In ambito industriale viene effettuata la macinazione a frizione basata sul passaggio dei chicchi, solitamente per caduta, attraverso lo spazio vuoto tra attrezzi in movimento chiamati "macine". Le coppie di macine utilizzate nell'industria del caffè hanno, solitamente, una forma cilindrica: si tratta di una coppia di cilindri rigati con assi paralleli che ruotano in direzioni opposte. I chicchi sono introdotti nel macchinario con caduta programmata.

Gli strumenti utilizzati per la macinatura, all'interno di impianti produttivi, possono avere un diametro compreso tra i 120 e i 200 mm, una lunghezza che varia tra i 200 e i 900 mm per effettuare una macinatura di 200kg fino a diverse tonnellate di caffè per ora (Folmer, 2017).

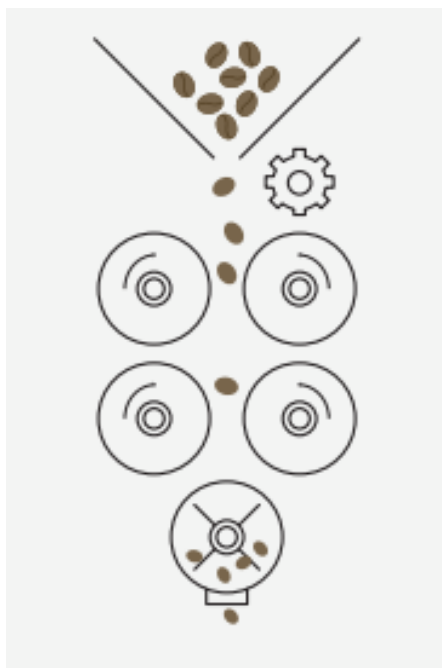


Figura 14 - Schema macina a due stadi. Immagine: Coffee Sapiens.

I rulli sono costituiti da materiali ferrosi duri e resistenti. Sono presenti, normalmente, in superficie, dei solchi radiali o assiali. In diversi casi, però, questi sono voluti appositamente lisci.

I rulli possono, inoltre, ruotare a differenti velocità. L'impostazione di parametri diversi potrà quindi restituire dei risultati differenti. Tuttavia, la configurazione ottimale può essere determinata esclusivamente in modo empirico.

Le tipologie di coppie di macine maggiormente utilizzate si distinguono principalmente per forma e metodo di processo.

Macine a disco

Il funzionamento è basato su due dischi paralleli sovrapposti in modo che le loro basi siano vicine tra loro. Una delle due basi ruota intorno al proprio asse, mentre l'altra rimane ferma. Tali macine sono utilizzate, solitamente, per torrefazioni di piccole dimensioni.

Macine a rullo

Costituite da due cilindri rigati con assi paralleli, controrotanti e vicini tra loro.

Macine coniche

Costituite da un ingranaggio conico che ruota all'interno di una cavità. Introduzione dei chicchi a caduta dall'alto.

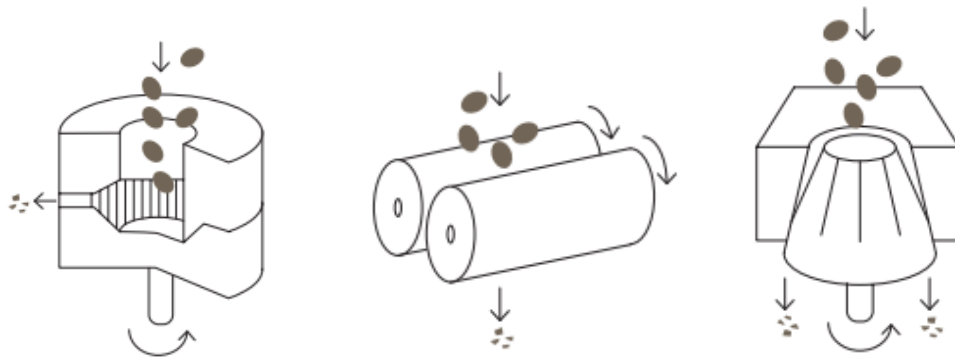


Figura 15 - Schema macina a disco, a rullo e conica. Immagine: Coffee Sapiens.

3.4. Degassaggio

Durante il periodo di conservazione, il caffè tostato subisce modifiche chimiche e fisiche notevoli, che incidono sensibilmente sulla qualità della bevanda. Tra queste ci sono, ad esempio, il rilascio di anidride carbonica, assorbimento di sostanze volatili che causano l'ossidazione del prodotto e la migrazione di oli verso la superficie.

L'anidride carbonica, il principale composto non aromatico volatile presente nel caffè appena tostato, viene generata in fase di tostatura (Hodge, 1953) ed è causa di diversi problemi riguardanti soprattutto il confezionamento: uno dei principali problemi causati dal rilascio di composti volatili nell'industria di caffè è il rilascio di anidride carbonica in periodi successivi al confezionamento, il quale può influenzare l'integrità della confezione specialmente se è costituita da materiale flessibile. A causa delle alte temperature presenti nella fase di tostatura, il caffè tende a sprigionare una certa quantità di anidride carbonica che renderebbe poco efficiente il processo di confezionamento, specialmente se sottovuoto.

L'anidride carbonica formatasi durante la tostatura è intrappolata nella struttura dei chicchi e viene rilasciata durante un periodo di diversi giorni generando una perdita di peso di circa 1.5%. La quantità di gas rilasciata è stimata intorno a 6-10 litri per Kg di caffè a seconda del grado di tostatura. Le tostature più lunghe e più scure allungano i tempi di degassamento in quanto il caffè contiene più anidride carbonica rispetto a un caffè tostato chiaro. Il degassamento si lega altresì alle microfratture che si producono nel chicco durante la tostatura; queste facilitano il rilascio di CO₂, degli aromi volatili, nonché degli oli in superficie.

A tostatura scura sono stati, infatti, raccolti i dati più elevati. (Clarke, 1987; Shimoni e Labuza, 2000). Il grado di degassaggio è maggiore nelle prime fasi successive alla tostatura, dove viene rilasciato il 40% della CO₂ e, successivamente si riduce in modo graduale.

La temperatura incide particolarmente sulla quantità di rilascio di sostanze volatili dal caffè. Altro fattore che incide notevolmente sul degassaggio è senza dubbio la granulometria del caffè macinato.

Durante la macinatura, un ammontare significativo di anidride carbonica prodotto durante la tostatura viene rilasciato. Tale perdita è dovuta, principalmente, alla rottura delle regioni in cui il gas è intrappolato. È mostrato, inoltre, come il contenuto residuo di anidride carbonica contenuto nel caffè decresce con la diminuzione della dimensione delle particelle (Barbera, 1967). Circa il 45% di anidride carbonica ottenuta durante la tostatura è rilasciata durante i primi 5 minuti di macinatura (Heiss, Radtke e Robinson, 1977). Tuttavia, una significativa percentuale di gas è ancora trattenuta dal caffè durante il confezionamento (2-3 mL/g) (Shimoni e Labuza, 2000).

Il processo di degassaggio è il processo durante il quale vengono eliminati, per dispersione, i gas contenuti nei chicchi di caffè tostati.

Tale fase viene svolta, industrialmente, all'interno di appositi silos di stoccaggio e risulta necessaria al miglioramento della qualità del caffè. Tale operazione riduce, infatti, il rischio di sovrappressione nel prodotto confezionato favorendo, in tal modo, la conformità del prodotto finito.

È importante sottolineare come a causa dell'alta sensibilità del caffè tostato macinato all'ossigeno, qualsiasi tempo di attesa in presenza di aria durante il periodo precedente al confezionamento causa una perdita del 10% della shelf life al giorno (Heiss et al., 1977; Cardelli, 1997). Da qui nasce, ovviamente, il bisogno di rimuovere contemporaneamente qualsiasi residuo di ossigeno dalla confezione.

È essenziale, quindi, stabilire i parametri della cinetica di rilascio di anidride carbonica e quali siano le condizioni di equilibrio per ottenere un buon controllo sul rilascio di gas e sulla concentrazione finale all'interno della confezione.

La fase di degassaggio, all'interno dei silos, viene svolta tramite l'impiego di azoto che si comporta da gas inerte. In tal modo si riduce la presenza di ossigeno all'interno dei silos stessi (Coffee Sapiens, 2018).

Il caffè macinato resta per un certo periodo di tempo all'interno di contenitori di stoccaggio;

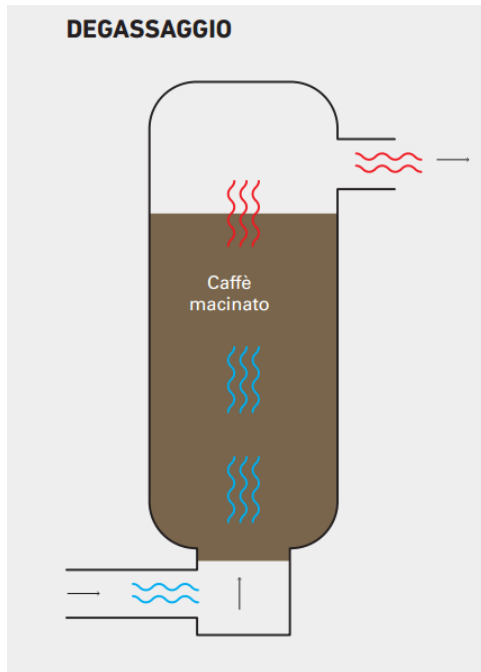


Figura 16 - Schema silos degassaggio: Ingresso gas inerte (in blu), fuoriuscita di gas (in rosso).

- Durante questo processo viene immesso dell'azoto all'interno dei silos;
- Il tempo totale del trattamento dipende dal grado di macinatura: un tempo più lungo è richiesto per le macinature più grossolane.

Nonostante la diminuzione di dispersione di gas dopo un certo periodo di tempo, il rilascio prosegue anche dopo il confezionamento del prodotto. Diversi metodi sono stati sviluppati per ridurre questa tipologia di problema come ad esempio il seguire una serie di passaggi prioritari prima di applicare il confezionamento come imballaggio sottovuoto o utilizzo di valvole unidirezionali (Radtke, 1973, Heiss, Radtke e Robinson, 1977) che facilitano la fuoriuscita di gas dall'interno del pacchetto e, allo stesso tempo, limitano l'ingresso dell'aria e l'ossidazione del prodotto.

Risulta complicato stabilire delle regole che consentano un degassaggio ottimale a causa delle molteplici variabili presenti nella fase di tostatura e nella natura dei chicchi che fanno sì che ci siano differenze sostanziali in termini di tempistiche.

La fase di degassaggio può essere totale nel caso in cui il caffè venga poi confezionato in soluzioni di packaging sigillati che non permettono ulteriore fuoriuscita di gas come il caffè in capsule. Il degassaggio può essere parziale nel momento in cui il confezionamento avvenga nei cosiddetti soft pack dotati di valvola unidirezionale.

Su quest'importante fase di produzione verterà la progettazione e l'analisi di un piano sperimentale, che consentirà di stimare l'influenza dei diversi fattori, quali tostatura, macinatura, origine e crivello sulla variazione di pressione all'interno dei silos e, quindi, sulla quantità di gas liberata.

3.5. Confezionamento

3.5.1. Shelf life del caffè

È fondamentale che il caffè mantenga una qualità organolettica ottimale per un intervallo di tempo stabilito.

Per il caffè torrefatto e macinato, diversi cambiamenti fisico-chimici, seppur inevitabili, avvengono con un'intensità e velocità che è dipendente dalle condizioni ambientali e, soprattutto dalla modalità di confezionamento oltre che dal materiale utilizzato.

I cambiamenti nel profilo aromatico del caffè sono dovuti principalmente a:

- Reazioni chimiche che portano alla perdita di alcuni composti aromatici o all'assorbimento di altri composti spesso sgraditi;
- Ossidazione e irrancidimento di composti.

I fattori che influenzano maggiormente la shelf life del caffè sono:

- La presenza di ossigeno nel packaging la quale riduce la potenziale shelf life nel prodotto. Essa comporta non solo la perdita di composti aromatici, ma anche la formazione di altre sostanze indesiderate;
- La temperatura che condiziona il caffè sia dal punto di vista chimico che fisico. Temperature più alte accelerano le reazioni di degradazione;
- L'umidità, dovuta al quenching o all'assorbimento di umidità ambientale, favorisce la perdita di composti aromatici oltre ad abbreviare la shelf life del prodotto;
- La luce funge da catalizzatore per alcune reazioni indesiderate e condurre al deterioramento degli oli superficiali del caffè.

3.5.2. Packaging

Tali cause di deterioramento fanno sì che ci si concentri sempre più nel migliorare diverse caratteristiche di packaging quali:

- Capacità di fungere da barriera contro ossigeno, temperatura, umidità e luce;
- Capacità di preservare l'aroma del caffè, proteggendolo da odori esterni;
- Essere chimicamente inerte.

Per il caffè tostato viene spesso utilizzato un contenitore dotato di valvola di degassaggio unidirezionale che permette il rilascio di CO₂ e allo stesso tempo impedisce l'ingresso di umidità e di ossigeno.

Per quanto riguarda il caffè macinato vengono utilizzati, solitamente, dei pacchetti sottovuoto o in atmosfera protettiva costituiti da film multistrato che, a seconda del tipo di prodotto, ha una struttura più o meno spessa

Negli ultimi trent'anni ha avuto sempre maggiore diffusione l'utilizzo di capsule.

Le prime utilizzavano materiali come il polipropilene che necessitavano di un sovra-imballo per garantire una certa shelf life. Negli anni si è arrivati a produrre capsule autoprotette in atmosfera modificata in grado di preservare la qualità del prodotto senza necessità di un sovra-imballo (Coffee Sapiens, 2018).

A causa della sua instabilità, il caffè tostato dovrebbe essere consumato immediatamente o confezionato in contenitori particolari a tenuta di acqua e di ossigeno.

Confezionamento in aria

Il confezionamento ad aria consiste semplicemente nel riempire e sigillare ermeticamente la confezione. Il caffè risulta, così, protetto dall'umidità e dalla luce. Tuttavia, la presenza di aria nella confezione fa sì che l'alto livello di ossigeno riduca notevolmente la *shelf life*. Tale tecnica è utilizzata solo con caffè già degassato per evitare il rigonfiamento dell'imballo. Se il caffè non è completamente degassato viene spesso utilizzata una valvola di sicurezza unidirezionale che, posizionata sulla confezione, permette all'anidride carbonica di fuoriuscire impedendo l'ingresso dell'aria. Lo svantaggio è rappresentato dal fatto che parte dell'aroma fuoriesce dalla valvola insieme all'anidride carbonica impoverendo il gusto finale.

Confezionamento sottovuoto

Tale tecnica è utilizzata per i materiali flessibili per le confezioni di caffè macinato sottovuoto e garantisce una diminuzione del livello di ossigeno all'interno della confezione e conseguente aumento della shelf life del prodotto.

Confezionamento in atmosfera protetta

In atmosfera protetta l'aria all'interno del contenitore viene sostituita da gas inerte con l'utilizzo di cicli di vuoto seguiti dall'immissione di gas. L'uso di gas inerte incide molto sulla shelf life e genera maggiori vantaggi rispetto al confezionamento in aria. Anche in questo caso, per evitare rigonfiamento del pacchetto, generalmente, il caffè viene confezionato dopo il degassaggio oppure è necessario dotare la confezione di una valvola unidirezionale.

3.6. Percolazione

Si definisce percolazione lo scorrimento di un fluido attraverso un mezzo poroso. Dal punto di vista fisico, preparare una tazza di caffè significa far percolare una quantità specifica di acqua, riscaldata per via diretta o indiretta, attraverso un letto compatto di particelle di caffè macinato definito pannello.

La velocità media dell'acqua rimane costante attraverso il letto di particelle, per fornire un getto continuo, mentre la pressione cala lungo l'asse di percolazione fino a raggiungere il livello atmosferico. Una certa pressione è necessaria per ottenere un flusso attraverso letti di caffè macinato;

La principale variabile dipendente che è possibile misurare in maniera oggettiva è la resa di estrazione, ossia il rapporto tra la massa del materiale solubile di caffè che viene trasferito nella tazza e il totale di materiale di caffè utilizzato.

La resa di estrazione è correlata, ovviamente, alla qualità sensoriale. Essa infatti può condurre a due errori di preparazione già citati nei precedenti capitoli: la sotto-estrazione e la sovra-estrazione:

- Per sotto-estratto si intende quella condizione in cui la presenza di caffè macinato grossolanamente non permette un tempo di infusione abbastanza lungo e mitiga l'estrazione del gusto cremoso. La sotto-estrazione fa sì che verso la tazza vengano spinte le sostanze più solubili che sono principalmente quelle acide e quelle dolci;
- Il caffè sovra-estratto si ottiene a causa di particelle troppo fini che prolungano notevolmente il tempo di estrazione e le sostanze aromatiche vengono estratte oltremisura. La sovra-estrazione forza nella tazza le sostanze più amare e astringenti. Il risultato può essere una bevanda molto aspra con una crema scura o bruciata (Lingle, 2011).

La temperatura e il tempo di preparazione svolgono un ruolo fondamentale sulla variabilità della resa, inoltre, è noto come le tostature più scure producono rese più alte.

È utile ricordare come la resa è un concetto diverso dalla "concentrazione" della bevanda, la quale si misura in grammi di materia estratta per litro di bevanda.

La macchina da caffè è in grado di:

- Contenere una porzione di caffè macinato in un contenitore che permetta alla bevanda di colare mentre le particelle vengono trattenute;
- Conferire all'acqua una temperatura intorno ai 90°C e una pressione adatta alla percolazione.

3.6.1. Parametri che influenzano la percolazione

Dose caffè macinato

Per dose si intende il peso di caffè tostato e macinato necessario alla preparazione della bevanda. Dosi minime, pari a circa 5 grammi di prodotto per l'espresso, sono accettabili nei

casi in cui si utilizza un caffè a tostatura scura che contiene un contenuto maggiore di sostanze solubili o nel caso in cui la miscela sia costituita da varietà robusta che ha una maggiore resa di estrazione, non necessariamente qualitativa. Una dose eccessiva può portare al deposito di fondi nella tazza in quanto non permette una sufficiente espansione durante l'inumidimento del letto di caffè macinato.

Distribuzione di dimensioni delle particelle

Come già descritto nei precedenti capitoli, la granulometria del caffè è un fattore cruciale per l'estrazione della bevanda. La caratteristica più studiata è la distribuzione delle dimensioni delle particelle, ma anche la forma è oggetto di studi ed argomento di grande interesse.

Come visto nei paragrafi precedenti, la distribuzione granulometrica viene descritta con una curva bimodale: una caratteristica di granulometria così complessa porta ad avere un doppio effetto: da una parte, forma una struttura grossolana che permette il corretto flusso attraverso il letto di particelle; dall'altra, fornisce una certa quantità di polveri fini che permette l'estrazione di grande quantità di materiale solubile.

I frammenti minori, durante la percolazione, migrano nella direzione del flusso concentrandosi sul fondo del letto. Ne consegue che la portata ha un calo dipendente dal tempo (Illy e Viani. 1995).

Temperatura di infusione

L'estrazione del caffè, dipende, come in ogni reazione di dissoluzione, dalla velocità e dalla temperatura. A temperature più elevate vi è una maggiore percentuale di materiale estratto. Ovviamente, l'estrazione di sostanze amare e astringenti a temperatura più alte tende a peggiorare l'esperienza sensoriale.

Pressione di infusione

Una volta bagnate, le particelle di caffè macinato si gonfiano e si saldano tra di loro in modo tale che la percolazione raggiunge, solo sin una determinata fase, uno stato stazionario. Tale effetto potrebbe dimostrare come la pressione di infusione non sia costante durante l'erogazione.

Nelle macchine per uso domestico, azionate da una piccola pompa a vibrazione, la pressione non può essere regolata ed è, quindi, determinata solo dalla resistenza idraulica del pannello. La macinatura assume così un valore ancora rilevante in quanto la dimensione di particelle non va ad incidere solamente sul tempo, ma anche sulla pressione di estrazione.

Tempo di percolazione

Il gusto abituale di ogni luogo detta le regole per il volume che può essere 25-30 ml per l'espresso o di 70, 90 o 110 ml per i caffè lunghi. Per quanto questo possa essere un criterio rispettabile, è piuttosto insidioso visto che non stabilisce nessuna regola di durata della percolazione che rischia così di diventare troppo lunga, ovvero oltre i 60 secondi. La bevanda che ne risulta è così sovra-estratta, con gusto amaro e astringente.

Tempi di estrazione molto brevi producono, al contrario, una bevanda dal gusto scialbo e annacquato.

È fondamentale considerare la variabile tempo di estrazione come una variabile principale e non come variabile indipendente. Se si desidera ottenere un alto volume di bevanda è utile aumentare la dimensione del caffè macinato e non prolungare il tempo di estrazione (Illy e Viani, 1995).

4. Design of Experiment (DoE)

Un esperimento può essere definito come una serie di prove per le quali vengono apportate modifiche alle variabili di ingresso del processo, in modo tale che risulti possibile osservare, o verificare, eventuali variazioni nella variabile in uscita.

Alcune variabili di processo sono sicuramente controllabili, mentre alcune variabili non lo sono.

Le variabili di input saranno comunemente definite **fattori** e i valori che queste possono assumere saranno definiti **livelli**.

Per valutare le risposte di un Design Of Experiment possono essere usati differenti approcci:

- Un approccio potrebbe essere quello di scegliere una combinazione di fattori del tutto arbitraria e osservare il valore della variabile in uscita. Successivamente, dato il risultato della prova precedente, modificare uno o più fattori e replicare l'esperimento andando così avanti per tentativi;
- L'approccio più diffuso è, però, rappresentato dal definire un livello base per ciascuno dei fattori ed effettuare quindi l'esperimento con dei valori iniziali; quindi far variare i livelli di ciascun fattore, mantenendo gli altri costanti al loro livello base. Una volta che tutte le prove sono state effettuate è possibile, ad esempio tramite grafici, valutare l'influenza sulla risposta di ciascuno dei fattori. Questo approccio non è però in grado di valutare le possibili interazioni tra le variabili;
- Per tenere traccia delle interazioni, conducendo esperimenti con più fattori, l'approccio più corretto è quello del piano fattoriale, secondo cui i fattori variano in modo congiunto. Lo svantaggio dell'utilizzo di tale approccio è sicuramente il numero elevato di prove da effettuare. Avendo, ad esempio, tre fattori, i quali possono variare su due livelli, il numero di prove da effettuare, escludendo eventuali repliche, sarebbe di 2^3 . Un piano sperimentale di questo tipo, però, darebbe la possibilità di indagare sugli effetti individuali di ciascun fattore, definiti effetti principali e di determinare eventuali interazioni tra i fattori stessi.

La progettazione di un piano sperimentale è di solito utile per determinare quali variabili di processo influenzino la risposta. In termini di processo aziendale e produttivo può essere logico programmare un esperimento al fine di ottimizzare il processo stesso determinando, quindi, la regione dei fattori che porta alla migliore risposta possibile.

4.1. Principi della sperimentazione

I tre pilastri fondamentali della pianificazione sperimentale sono la replicazione, la casualizzazione e eventuale impiego di blocchi.

Replicare un esperimento n volte consente di stimare l'errore sperimentale e capire, quindi, se le differenze osservate nei dati siano statisticamente significative. Se si avessero $n = 1$ repliche e si osservassero, per due livelli differenti dello stesso fattore, due risposte $Y1$ e $Y2$, la differenza osservata potrebbe essere il risultato di un errore sperimentale.

La replicazione consente, infatti, di ottenere una misura più precisa dell'effetto di un fattore. Per esempio, se σ^2 è la varianza relativa all'osservazione singola e ci sono n repliche, la varianza della media campionaria è $\sigma^2(\bar{Y}) = \frac{\sigma^2}{n}$.

Ciò implica che se n fosse abbastanza grande, avendo osservato le due medie campionarie $\bar{Y}1 > \bar{Y}2$, si potrebbe pervenire alla conclusione che effettivamente $Y1 > Y2$.

È importante riuscire a distinguere una replicazione da una misura ripetuta, cioè un'esecuzione ripetuta di una rilevazione statistica. La variabilità osservata nelle misure ripetute di una risposta, infatti, riflette direttamente la variabilità interna propria del sistema di misura. La replicazione denota, invece, determinazioni eseguite in differenti luoghi o in tempi definiti nel piano degli esperimenti. La replicazione riflette fonti di variabilità sia tra le prove sia entro le prove.

La casualizzazione delle prove sperimentali indica come l'allocazione del materiale per gli esperimenti e l'ordine con cui vengano eseguite le prove, debbano essere nel modo più possibile casuali. Casualizzando le prove, infatti, viene limitato l'effetto di tutti i fattori estranei che potrebbero essere presenti. È importante che non ci sia una distorsione sistematica dovuta, ad esempio, all'utilizzo di un prodotto diverso per due livelli di un medesimo fattore. Usare il macchinario A per le prove con prodotto 1 e il macchinario B per le prove con prodotto 2 porta a una distorsione sistematica che porta a risultati diversi dovuti all'utilizzo di due macchinari diversi piuttosto che alla diversa varietà di prodotto.

La casualizzazione limita anche l'effetto dei fattori introducibili nel tempo come il deterioramento degli strumenti: fare le prime n prove con livello A del fattore e le altre n con livello B dello stesso fattore potrebbe portare a una distorsione dovuta all'usura dello strumento che verrà confusa con l'effetto del livello del fattore.

Oltre a casualizzare la sequenza delle prove sarebbe necessario assegnare casualmente il materiale sperimentale, gli operatori o gli strumenti di misura.

Il blocco è una tecnica statistica, usata per ridurre o eliminare la variabilità trasmessa da fattori di disturbo, cioè fattori che sono in grado di modificare la risposta sperimentale, ma per i quali non c'è interesse diretto. Spesso il blocco è utilizzato quando la materia prima proviene da fornitori diversi (in questo caso la risposta può essere influenzabile dalla diversa fornitura) o nei casi in cui la materia prima prodotta per gli esperimenti non sia sufficiente per tutte le prove ed è quindi necessario reperirne un altro lotto. In questo caso ogni insieme di condizioni non omogenee definisce un blocco che consentirebbe di eliminare un'eventuale variabilità dovuta al fornitore o al lotto (Montgomery, 2005).

4.2. Schema di pianificazione degli esperimenti

È necessario seguire una procedura ben consolidata per l'analisi del problema, la progettazione degli esperimenti e le modalità di esecuzione:

1. Riconoscimento, formulazione del problema e definizione dell'obiettivo da raggiungere tramite la sperimentazione;
2. Scelta dei fattori e dei livelli. Identificare fattori che possano in qualche modo influenzare il processo e distinguerli tra fattori di progetto, sui quali si ha necessità di indagare, fattori tenuti costanti che influiscono sulla risposta, ma che non sono di diretto interesse sull'esperimento e fattori di disturbo, controllabili se lo sperimentatore può fissarne i livelli o non controllabili, che influenzano la risposta, ma che non sono interessanti nel contesto dell'esperimento;
3. Scelta della variabile di risposta. Identificare variabili dalle quali si possa ricavare un'informazione utile sul processo sotto studio;
4. Scelta del piano sperimentale;
5. Esecuzione delle prove sperimentali. Riuscire a tenere il processo sotto controllo, rispettare i piani ed evitare qualsiasi errore nella procedura sperimentale;
6. Analisi dei dati tramite metodologie statistiche per rendere oggettive le conclusioni a cui si giunge.

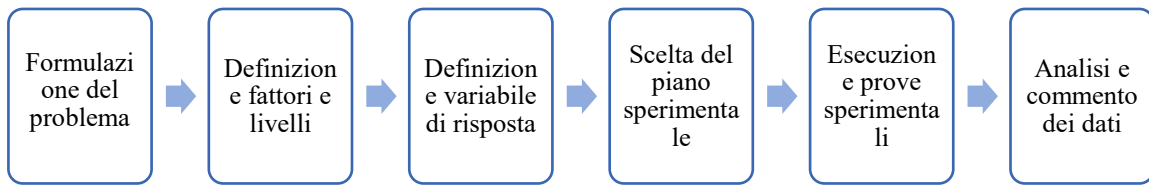


Figura 17 - Schema di pianificazione degli esperimenti.

4.3. Piano sperimentale: Miglioramento caffè in capsule

4.3.1. Formulazione del problema

Luigi Lavazza S.p.A. necessita di una metodologia di progettazione e di analisi che consenta di ottimizzare il processo di produzione di caffè in capsule, cioè di determinare le ottimali configurazioni dei vari fattori produttivi che portino al raggiungimento della migliore risposta possibile in termini di erogazione. Tale approccio metodologico sarà, allo stesso tempo, utile alla caratterizzazione del processo, ovvero alla quantificazione dell'effetto di alcune variabili sulle risposte e sarà considerato una rampa di lancio per la progettazione di nuovi prodotti.

L'obiettivo della progettazione del piano sperimentale si identifica con il miglioramento della qualità in tazza di caffè in capsule.

Il metodo di definizione del piano sperimentale da attuare è stato quello di prendere in considerazione tutti i fattori che possano, in modo più o meno accentuato, influire sulla resa in tazza. Una fase successiva ha permesso di definire al meglio il piano e identificare, in tal modo, solo quei fattori principali la cui variazione possa portare a esplicitazioni diverse delle variabili di risposta. Si è resa quindi necessaria la riduzione del numero di fattori oltre che dei rispettivi livelli, per consentire la realizzazione di un piano ammissibile in termini di numero di prove.

Sono stati fatti emergere tutti i diversi punti di vista sollecitando diversi team di lavoro e sono stati definiti gli obiettivi di sperimentazione tra cui la conferma degli effetti di alcuni fattori sulla variabile di risposta e l'esplorazione di nuovi materiali e nuove condizioni operative.

4.3.2. Fattori e livelli

Una volta definiti i fattori di progetto, ovvero quei fattori sui quali si vuole effettivamente indagare, è ovviamente necessario definire la regione di interesse per ciascun fattore e in quanti livelli esplicitare ciascuna variabile.

È ovvio come la definizione dei livelli di ciascun fattore necessita di un'approfondita conoscenza del processo.

Luigi Lavazza S.p.A. si riserva il diritto di oscurare alcune informazioni in quanto ritenute strettamente confidenziali.

Miscela

L'obiettivo del piano sperimentale è quello di analizzare l'effetto della miscela sulla qualità in tazza e sul processo di erogazione.

In questo caso sono state prese in considerazione tre macro-categorie di varietà:

- Arabica naturale;
- Arabica lavata;
- Robusta.

Per questo fattore sono analizzati tre livelli corrispondenti a tre miscele costituite, ciascuna, da due varietà di caffè e, per ciascuna macro-categoria sopracitata è stata presa in considerazione una sola origine.

I livelli del fattore miscela sono stati quindi definiti come combinazione delle tre origini prese in considerazione:

- Miscela 1;
- Miscela 2;
- Miscela 3.

Tostatura

In una prima fase progettuale del piano sperimentale erano stati considerati diversi parametri di tostatura. Tra questi c'erano il tempo e la temperatura di raffreddamento e il curing time ovvero il tempo che intercorre tra il termine del processo di tostatura e l'inizio della fase di macinatura.

Nel piano sperimentale definitivo, per il quale si è preferito ridurre il numero di fattori e livelli per garantirne l'ammissibilità, sono stati presi in considerazione due livelli riguardanti le modalità di tostatura indipendentemente dalle macchine utilizzate e da altri parametri.

Il ciclo breve fa riferimento a un ciclo ad aria caratterizzato da una durata inferiore ai 500 secondi.

Un secondo livello relativo al fattore ciclo di tostatura è invece rappresentato da un ciclo di durata maggiore. Generalmente, come si apprende dalla letteratura, in modo dipendente dal tempo di tostatura può essere ottenuta una maggiore o minore densità del caffè in relazione alla variazione di volume del chicco.

I due livelli definiti in fase di progettazione sono rappresentati quindi da:

- Ciclo di tostatura breve;
- Ciclo di tostatura lungo.

Raffreddamento

Un altro parametro considerato, il quale viene fatto variare nella fase finale del processo di tostatura riguarda la fase di preraffreddamento.

Il quenching rappresenta la quantità di acqua utilizzata per il raffreddamento del caffè in grani al termine della tostatura. Tale parametro viene misurato in termini di calo peso del caffè tostato tramite bilancia termica.

I due livelli considerati per tale fattore corrispondono a quantità differenti di acqua utilizzata in modo da ottenere dei cali peso differenti per le due situazioni.

- Raffreddamento standard;
- Raffreddamento aumentato.

Macinatura

Per quanto riguarda la macinatura sono tirati in gioco diversi parametri che influiranno in modo più o meno accentuato sulle diverse variabili di risposta. Sono stati considerati, nella definizione del piano, due fattori strettamente dipendenti tra di loro, ovvero il X50 e la percentuale di polveri.

Il X50, come descritto nei precedenti capitoli, rappresenta la mediana della distribuzione bimodale delle particelle di caffè. Tale valore indica quindi che la metà delle particelle ha una dimensione, in termini di diametro, inferiore a quello definito e la restante metà una dimensione maggiore.

La percentuale di polveri è rappresentata, invece, dalla percentuale di particelle, rispetto al totale, che hanno un diametro inferiore o pari a 100 μm . In termini di curva granulometrica questa viene mostrata dall'area sottesa al grafico tra 0 e 100 μm .

I due fattori sono, in un certo senso, strettamente dipendenti, ma è possibile, comunque, ottenere una percentuale leggermente diversa di polveri a parità di valore di X50 definito.

In questo caso si è in presenza di un fattore annidato in cui i livelli del fattore B non sono identici a differenti livelli di un altro fattore A. Tale disposizione è chiamata piano annidato, o gerarchico, con i livelli del fattore B annidati entro i livelli del fattore A.

Per ciascun livello di X50 sono definiti due valori di percentuale di polvere indicate rispettivamente come alte e basse e che si discostano tra loro di circa tre punti percentuali.

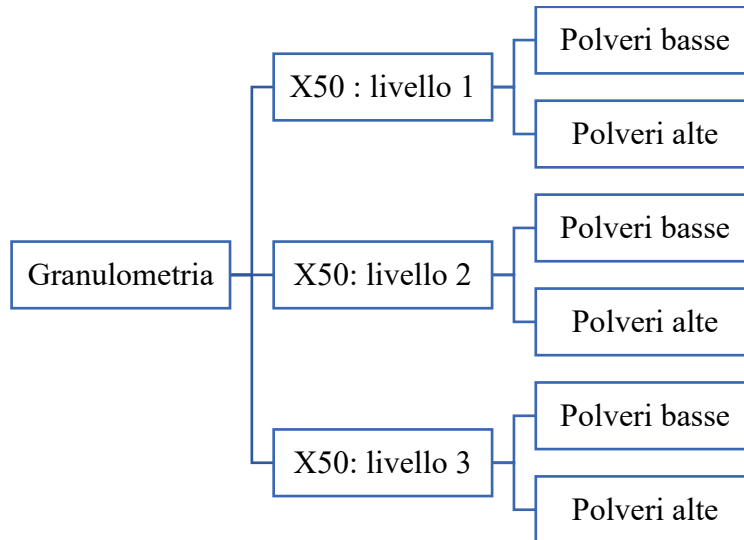


Figura 18 - Schema fattori annidati X50 e polveri. Si considerano fattori annidati in quanto il valore dei livelli del fattore Polveri non è identico per ciascuno dei livelli del fattore X50.

La regione di esplorazione, ovvero l'intervallo dei livelli considerati, per tale variabile, risulta relativamente grande perché si è reso necessario effettuare uno screening del fattore per caratterizzare al meglio il processo.

Lid

In fase di confezionamento si è interessati alla valutazione dell'effetto di lid, ovvero il rivestimento superiore della capsula. In questo caso, oltre al lid indicato, da qui in avanti, come standard è stato utilizzato un lid di un secondo fornitore con caratteristiche differenti in modo da essere in linea con gli obiettivi di progetto relativi all'esplorazione di nuovi materiali e nuovi modi di operare:

- Lid Standard;
- Lid Alternativo.

Fattori costanti e fattori di disturbo controllabili

Altri fattori di processo che influenzano in modo significativo le variabili di risposta sono stati mantenuti costanti.

Tra questi viene messo in risalto il grado di tostatura il quale è stato mantenuto costante cercando di ottenere, in fase di tostatura, il medesimo colore per tutti i campioni realizzati. Questo è stato fatto per permettere una migliore valutazione degli effetti dei restanti fattori e per ridurre il numero di variabili del piano sperimentale.

È stata invece considerata come variabile *covariata* la macchinetta erogatrice utilizzata per le prove. Per motivi tecnici sono state utilizzate due macchinette erogatrici per le quali potrebbe essere utile analizzarne la variabilità senza, tuttavia, considerarle come fattori del piano sperimentale.

Altri fattori di disturbo controllabili saranno i giorni della settimana in cui saranno eseguiti gli esperimenti e gli operatori addetti alle attività.

FATTORE	LIVELLI
1. Miscela	1.1. Miscela 1
	1.2. Miscela 2
	1.3. Miscela 3
2. Tostatura	2.1. Ciclo breve
	2.2. Ciclo lungo
3. Raffreddamento	3.1. Standard
	3.2. Aumentato
4. X50	4.1. Livello 1
	4.2. Livello 2
	4.3. Livello 3
5. Polveri (X50)	5.1. Alte
	5.2. Basse
6. Lid	6.1. Standard
	6.2. Alternativo

Tabella 1 - Schema riassuntivo fattori e livelli DoE.

4.3.3. Variabili di risposta

Le variabili di risposta sono state definite in base a quelle informazioni che possano essere ritenute utili relativamente al processo sotto studio.

In termini di erogazione viene valutato il tempo di infusione che risulta caratteristica significativa per la valutazione della resa in tazza e la pressione media di infusione.

È interessante sottolineare come per la valutazione del tempo di infusione è stato preso in considerazione il tempo di infusione normalizzato e rapportato, quindi, a una dose a 110 cc. In tal modo viene preso in considerazione il parametro nel modo più oggettivo possibile e non viene fatta una valutazione su tempi di infusione che siano diversi tra di loro solo perché la dose erogata in tazza risulta sostanzialmente diversa.

VARIABILE DI RISPOSTA	Unità di misura
Tempo infusione normalizzato (110 cc)	Secondi
Pressione media infusione	Bar

Tabella 2 - Schema riassuntivo variabili di risposta DoE.

Molto spesso la qualità del caffè come bevanda viene misurata in termini di tempo di percolazione in rapporto al volume in tazza.

Oltre all'assaggio professionale, da parte di esperti, che darà sicuramente validi feedback dal punto di vista dell'estrazione della bevanda, è utile fornire comunque dei numeri reali e non soggettivi su cosa sia avvenuto durante l'estrazione.

Altre informazioni fondamentali da ricavare, al fine di avere una migliore caratterizzazione del processo, riguardano, infatti, la concentrazione di soluti all'interno della bevanda, la frazione solubile del caffè disciolta nel liquido e le caratteristiche della crema.

La prima risposta viene analizzata tramite lo studio dell'indice di rifrazione e misurata, quindi, in gradi brix. L'analisi dell'indice di rifrazione in un liquido è caratteristica di valutazione della concentrazione di soluti nella bevanda.

La percentuale di sostanze solubili estratte durante l'erogazione indica, invece, la quantità di sostanze disciolte nella bevanda in relazione alla quantità di caffè presente in capsula.

Per quanto riguarda la crema sono effettuate valutazioni in termini di volume, in relazione al volume totale della bevanda e, in termini di densità.

Per rendere ammissibile la fase di esecuzione del progetto e, trattandosi di prove relativamente onerose in termini di tempo e di risorse si è deciso, in fase di progettazione, di non effettuare valutazioni di tali risposte per tutti i campioni realizzati.

Le prove per la determinazione di quella che viene definita matrice di estrazione (°brix e percentuale di estrazione) (Lingle, 2011) e per la valutazione sulla crema vengono svolte solamente per alcuni tra i campioni per i quali è stato applicato un quenching maggiorato.

Inoltre, la valutazione viene fatta solamente per alcuni campioni caratterizzati, in termini di macinatura, dai due valori estremi di X50 tra i tre considerati.

VARIABILE DI RISPOSTA	Unità di misura
Concentrazione soluti	°Brix
Percentuale di estrazione	Percentuale
Densità crema	Secondi
Volume crema	mL

Tabella 3 - Schema riassuntivo variabili di risposta secondarie DoE.

4.3.4. Scelta del piano sperimentale

In un esperimento di questo tipo, già in fase di progettazione, è noto che alcuni livelli dei fattori daranno luogo a differenti valori nella risposta. L'interesse sta nell'identificare quali fattori causano questa differenza e nello stimare l'ammontare della variazione della risposta.

I piani fattoriali si dimostrano, solitamente, abbastanza efficienti in esperimenti che prevedono lo studio dell'effetto di più fattori.

Con il piano fattoriale vengono eseguiti esperimenti in cui sono provate tutte le possibili combinazioni di fattori e livelli. Ad esempio, se un fattore A è costituito da a livelli e un fattore B è costituito da b livelli, ogni replicazione contiene tutte le a X b combinazioni.

L'effetto di un fattore, definito effetto principale, è rappresentato dalla variazione nella risposta prodotta da una variazione nel livello del fattore.

In alcuni esperimenti possiamo notare che la differenza nella risposta tra i livelli del fattore non è analoga per tutti i livelli degli altri fattori. In tal caso vuol dire che c'è interazione tra i fattori.

I piani fattoriali risultano indispensabili in presenza di interazione per evitare conclusioni fuorvianti infatti, con un piano fattoriale, è possibile stimare gli effetti di ogni fattore a differenti livelli degli altri.

L'efficienza relativa di un piano fattoriale rispetto ad un piano in cui varia un fattore alla volta è, ovviamente, crescente con l'aumentare del numero di fattori (Montgomery, 2005).

4.3.5. Ipotesi di lavoro e assunzioni

Nel definire l'attuazione del piano sperimentale sono state riscontrate principalmente tre ipotesi di lavoro che obbligano, in fase sperimentale, a fare tre assunzioni fondamentali in quanto il modello teorico imporrebbe dei vincoli che in fase operativa non è possibile rispettare.

- Innanzitutto, durante l'esecuzione delle prove sperimentali, ogni qualvolta viene modificato il livello di un fattore, l'esperimento dovrebbe essere interamente ripetuto. Ad esempio, modificando il livello di X50 in fase di macinatura si dovrebbe ricostituire nuovamente la miscela ed effettuare nuovamente la tostatura. Questa modalità consentirebbe di non perdere il controllo del fattore e limitare gli effetti di variabili di disturbo. Tale operazione non risulta ammissibile a livello operativo dove una volta definita la miscela, il carico di un'intera tostata viene utilizzata per le diverse macinature e, di conseguenza, per il confezionamento;
- Durante l'esecuzione delle prove verrebbero effettuate delle ripetizioni di misure e non delle repliche. Si supponga che le capsule vengano confezionate simultaneamente in medesime condizioni e, successivamente, venga fatta una valutazione sull'erogazione su ciascuna capsula. In questo caso le misure effettuate riflettono le differenze tra le capsule e altre fonti di variabilità interne a quella particolare fase di confezionamento. In tal modo sarà come effettuare più prove con la medesima capsula. La replicazione riflette, invece, fonti di variabilità sia tra le prove sia entro le prove: per effettuare delle repliche corrette bisognerebbe, ad esempio, per ogni prova, ricostituire la capsula partendo dalle origini del processo;
- I metodi statistici richiedono che gli errori sperimentali siano variabili casuali indipendenti; la casualizzazione di regola rende valida questa assunzione. Casualizzando le prove vengono mediati anche gli effetti di fattori estranei eventualmente presenti. Il problema della casualizzazione delle prove riguarda il fatto che le prove a diversi livelli dei fattori dovrebbero essere effettuate in modo casuale cercando di limitare gli errori di tipo sistematico. In un contesto di questo tipo si assumono limitati i fattori di disturbo in quanto in prove sperimentali del genere è quasi impossibile ottenere una completa casualizzazione.

4.3.6. Stabilimento pilota

Lo stabilimento pilota ripropone, in scala ridotta, parte dell'impianto produttivo. Esso viene utilizzato, generalmente, per lo sviluppo di prove sperimentali e prove di laboratorio per le quali non vengono occupati gli impianti produttivi. Esso è caratterizzato dalla presenza da una tostatrice in grado di effettuare cicli ad aria più o meno lunghi con carichi di tostatura fino a 42 Kg e da un sistema di macinatura con carichi di circa 5 Kg di caffè tostato in grani. In questo sistema di tostatura, i chicchi vengono mantenuti in movimento tramite forze centrifughe che fanno in modo che questi migrino verso le pareti della vasca rotante per poi essere riportati nuovamente al centro. L'aria calda passa dall'alto verso il basso entrando nella camera di tostatura dalla parte inferiore.

A operazione finita, può essere utilizzato il quenching con acqua come metodo di preraffreddamento. I chicchi vengono, subito dopo, scaricati nella sezione di raffreddamento ad aria.



Figura 19 - Tostatrice sita presso impianto pilota.

La macchina per la macinatura presente all'interno dello stabile è uno strumento a due stadi dotato di una coppia di rulli rigati con assi paralleli che ruotano in direzioni opposte. Il primo e il secondo stadio sono rispettivamente denominati stadio di pre-rottura e stadio di finitura. Solitamente, all'interno degli impianti produttivi sono presenti macchinari a tre stadi con un'ulteriore coppia di rulli che garantiscono un'ancora maggiore precisione.

Giocando su diversi parametri della macchina quali distanza tra i rulli di pre-rottura, distanza tra i rulli di finitura e velocità relativa di ciascuna coppia di rulli è possibile ottenere profili granulometrici differenti a seconda delle necessità.

Solitamente, lavorando sulle distanze delle coppie di rulli di pre-rottura o finitura, si tende ad aumentare o diminuire la percentuale di polveri e X50 per ottenere il profilo granulometrico richiesto.

Un aumento della velocità relativa dei rulli in entrambi gli stadi tende a restituire caffè macinato con una maggiore percentuale di polvere.

In ogni caso bisogna procedere per tentativi per centrare i profili granulometrici richiesti facendo variare, in alcuni casi, anche la velocità di caduta del caffè verso i rulli.

È confermato, dalle diverse prove, come i profili granulometrici ottenuti dipendono da diverse ulteriori variabili come il quenching effettuato e la miscela che possono restituire macinature più o meno fini a parità di parametri di macinatura. Tendenzialmente si ottiene una minore percentuale di polveri quando viene utilizzata una grande quantità di acqua in fase di raffreddamento così come, generalmente, varietà di caffè lavato tende ad essere meno polveroso.



Figura 20 - Macina sita presso impianto pilota.

4.3.7. Metodi e strumenti

Per l'esecuzione del piano sperimentale si è utilizzata un'ampia gamma di strumentazione per la realizzazione dei singoli campioni, per la verifica di parametri e per la raccolta dati.

Si ha avuto modo, inoltre, di apprezzare le metodologie e la cultura tipica del reparto R&D dell'azienda Luigi Lavazza S.p.A.

Bilancia termica

Al termine del processo di tostatura, un campione di caffè tostato viene prelevato al fine di svolgere delle verifiche dei parametri di processo e capire, quindi, se il prodotto tostato è idoneo all'esecuzione del piano o va invece scartato.

In prima fase viene utilizzata la bilancia termica per misurare il calo peso e testare, quindi, che il quenching effettuato sia coerente con i valori definiti in fase di progettazione del piano sperimentale.

Lo strumento lavora secondo il principio termogravimetrico. All'inizio della misura, esso determina il peso del campione inserito che è circa pari a 3 grammi. Successivamente il campione viene riscaldato con il modulo riscaldante incorporato, provocando l'evaporazione dell'umidità. Durante l'essiccamento, lo strumento determina in continuo il peso del campione e indica la diminuzione dell'umidità. Quando l'essiccamento è terminato, viene visualizzato il risultato finale in termini di contenuto di umidità o peso secco del campione.

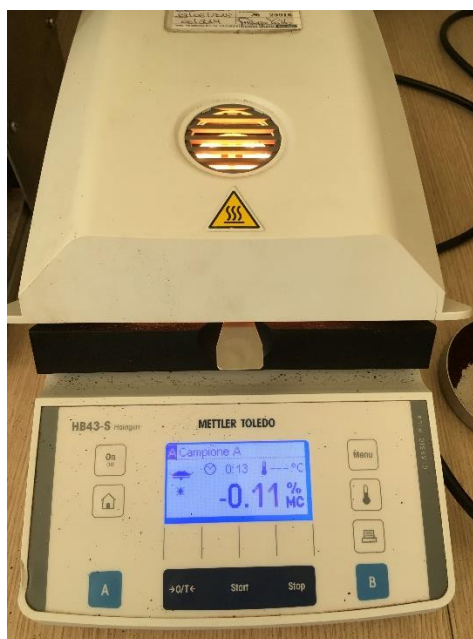


Figura 21 - Bilancia termica per misura calo peso.

Colorimetro

Una porzione di caffè prelevata al termine della fase di tostatura viene utilizzata per la misura del grado di tostatura. Un primo indicatore di qualità che consente di determinare se il grado di tostatura del caffè è il colore.

Come già descritto, questo è un fattore influente sulle variabili di risposta considerate, ma che, tuttavia, viene mantenuto costante durante l'esecuzione del piano.

Il colorimetro misura il colore del caffè in chicchi o macinato con una certa precisione.

Il fascio di luce a infrarossi emesso dallo strumento andrà a colpire il caffè macinato. Un caffè tostato più chiaro rifletterà più luce di un caffè tostato più scuro. La quantità di luce riflessa verrà convertita nella scala di tostatura Agtron.

In termini pratici un valore che va da 50 a 60 indica una tostatura chiara, mentre un valore inferiore a 40 è relativo a un prodotto tostato più scuro.

Nel piano sperimentale eseguito il colore è stato mantenuto costante.



Figura 22 - Colorimetro per misura del colore del caffè tostato e macinato.

Analizzatore a diffrazione laser

Durante la fase di macinatura, ogni qualvolta una quantità di caffè viene macinata ne viene analizzato il profilo granulometrico.

Essendo ben chiari gli obiettivi di macinatura da raggiungere, si cerca di centrare i valori puntuali di X50 e percentuale di polveri per procedere con la fase di confezionamento.

Lo strumento utilizzato per determinare la distribuzione della dimensione delle particelle consente di effettuare, in laboratorio, l'analisi di un campione di prodotto.

Il materiale viene accelerato e disperso nel flusso di aria e gli agglomerati vengono disgregati grazie alle collisioni tra particelle e con le pareti. Questo sistema è in grado di disperdere le particelle senza causarne la rottura e ottimizza la dispersione tramite la regolazione dell'aria compressa.

La tecnica di misura si basa sul principio che le particelle illuminate da un fascio laser diffondono la luce ad un angolo correlato alla loro dimensione. Al diminuire della dimensione delle particelle, l'angolo osservato di diffusione aumenta. Semplificando, particelle grandi diffondono la luce con angoli stretti ed alta intensità, mentre particelle piccole con angoli più ampi e bassa intensità.



Figura 23 - Analizzatore a diffrazione laser per misura profilo granulometrico.

Corpi capsula

I corpi capsula utilizzati in fase di confezionamento sono i corpi utilizzati in stabilimenti Luigi Lavazza S.p.A. per la produzione di capsule. Possono essere diversi per colore senza, però, avere caratteristiche differenti.

Pressino e Saldatrice lid

Trattandosi di uno studio relativo a caffè lungo è necessaria una quantità di caffè in capsula superiore alle normali dosi di espresso per evitare sovra-estrazione in tazza.

Una volta inserita la quantità in grammi corretta di caffè all'interno della capsula questo subisce una determinata pressione tramite l'ausilio di uno strumento dedicato.

Una volta inserito il caffè all'interno del corpo capsula quest'ultima viene chiusa ermeticamente con lid apposito.



Figura 24 - Strumento per termosaldatura lid su capsula.

Strumentazione per acquisizione dati

Per consentire l'acquisizione di dati durante l'erogazione, è necessaria una fase preliminare di "cablaggio" della macchina erogatrice.

Una valvola viene posizionata lungo il circuito idraulico, in un punto sito tra la pompa e il gruppo elettronico, per consentire un collegamento ad un manometro e rilevare, quindi, la pressione di infusione durante l'erogazione.

Dalla pompa a vibrazione vengono rilevati gli impulsi elettrici restituendo il tempo di lavoro della pompa stessa.

La cella di carico è in grado di rilevare il tempo di infusione dalla prima goccia.

Infine, una sonda di temperatura viene posta al beccuccio per rilevarne la temperatura durante la percolazione.

Il manometro, la cella di carico e la sonda di temperatura sono connessi ad un acquisitore di dati connesso in rete. Le diverse interfacce presenti consentono la gestione remota e supportano la visualizzazione sia grafica che numerica on-line e il salvataggio dei dati su PC oltre che alla possibilità di distribuire più sistemi in rete.

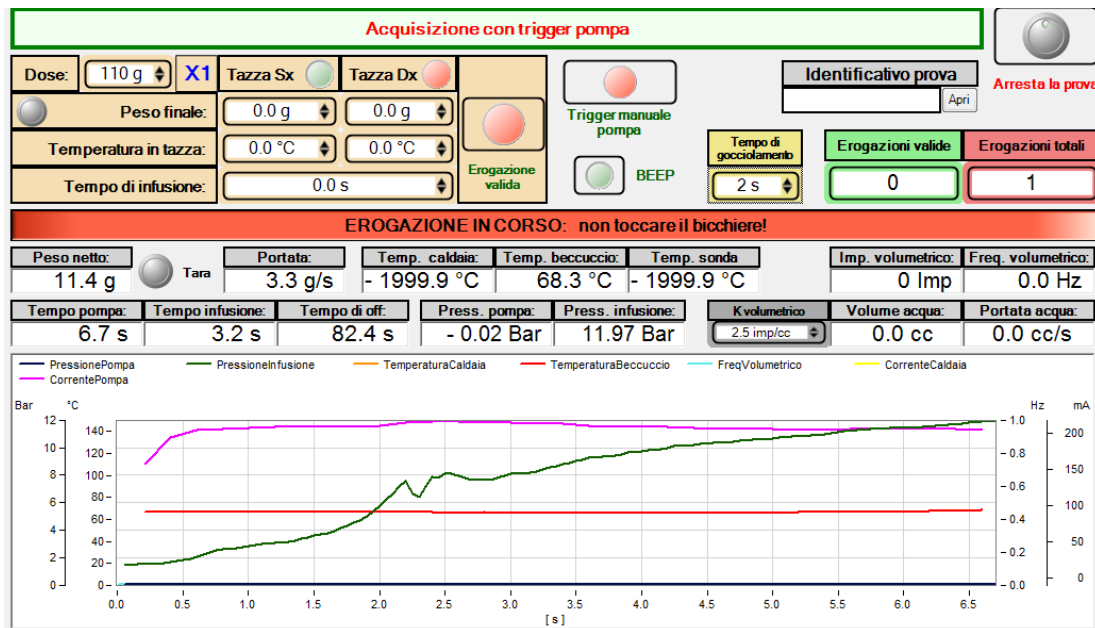


Figura 25 - Interfaccia di acquisizione dati durante l'erogazione. Si notano i dati relativi al peso netto in tazza, alla portata, alla temperatura al beccuccio oltre al tempo di infusione e la pressione relativa.

Rifrattometro

In fase di test in laboratorio viene utilizzato il rifrattometro, strumento che misura, tramite la rifrazione di una luce rispetto alla bevanda, precedentemente filtrata, la percentuale di sostanze disciolte in quel campione analizzato.

Esso è in grado di restituire il valore della concentrazione espressa in gradi brix ($^{\circ}\text{Bx}$). Generalmente, 1 grado brix corrisponde a una parte di sostanza solida in 100 parti di soluzione. Per ciascuna bevanda, però, in base ai soluti disciolti nella stessa, il fattore di risposta può essere diverso da 1: ad una precisa percentuale di concentrazione corrisponderà, quindi, un determinato valore espresso in $^{\circ}\text{Bx}$. Tale indice di risposta potrà essere ricavato empiricamente.

Tale parametro insieme alla percentuale di estratti è in grado di fornire risposte relative a una corretta estrazione e suggerire eventuali modifiche di parametri nel caso in cui si è di fronte a una bevanda sotto-estratta o sovra-estratta.



Figura 26 - Rifrattometro per valutazione gradi brix.

Percentuale di estratti

Per quantificare la frazione solubile del totale dei solidi, una volta terminata l'erogazione, la quantità di caffè erogata viene filtrata, inserita in semplici cristallizzatori e essiccata in stufa a temperatura di circa 105 °C.

Durante la filtrazione vengono trattenute le parti solide e non solubili (fondi di caffè) e si ottiene una bevanda costituita da acqua e una certa quantità di solidi disciolti.

Al termine dell'essiccazione, ovvero dopo un periodo di circa 12 ore, viene così misurato il peso delle sostanze ancora presenti nel cristallizzatore in modo da avere una stima della percentuale di sostanze solubili presenti in relazione alla quantità di caffè utilizzata per l'erogazione, ovvero la quantità di caffè presente all'interno della capsula.

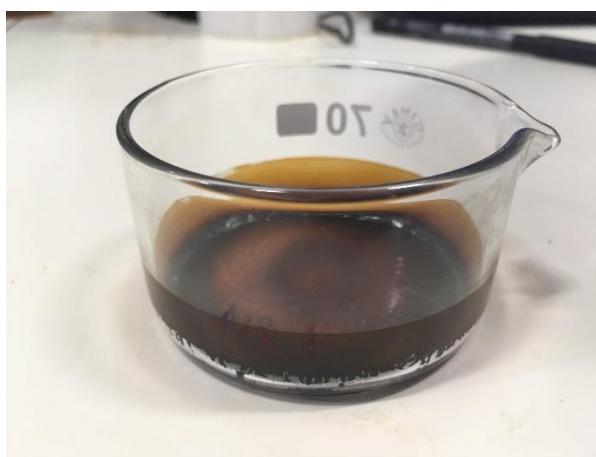


Figura 27 - Cristallizzatore al termine dell'essiccazione.

Valutazione crema

Per la valutazione della crema vengono sostanzialmente applicata due metodologie utilizzate dal reparto R&D.

Il volume della crema viene calcolato in relazione al volume totale della bevanda. Dato che la crema ha, solitamente, una vita abbastanza breve, la quantità deve essere misurata subito dopo la percolazione.

La densità viene invece valutata in laboratorio tramite l'utilizzo di un anello di rete metallica di dimensioni e peso standard poggiato sulla superficie della bevanda. Viene conteggiato con un cronometro il tempo che occorre affinché venga sommerso.

Solitamente, dopo un tempo trascorso di 60 secondi la prova viene interrotta.



Figura 28 - Metodo di valutazione densità crema in tazza.

4.3.8. Esecuzione prove sperimentali

Attività preliminari

Una volta programmate le caratteristiche di progetto e definiti, quindi, i fattori e rispettivi livelli, le variabili di risposta e il piano sperimentale da attuare si passa alla definizione delle attività da svolgere e alla strutturazione di un *gantt* di progetto che possa in qualche modo scandire e schedulare le fasi della sperimentazione.

Naturalmente, prima dell'avvio delle attività relative al piano sperimentale è utile, in contesti aziendali, svolgere alcune fasi preliminari che garantiscano consolidamento dei metodi da attuare e allineamento tra i team coinvolti.

Le prime settimane sono state infatti dedicate a diverse attività:

- Identificare problemi e anomalie relative all'impianto pilota che consentano di poter lavorare riducendo al minimo rischi futuri di rallentamento. Particolare attenzione è stata dedicata alla tostatrice e al suo corretto funzionamento sia dal punto di vista tecnico che dal punto di vista del software e della cabina di comando. Si evidenzia

come le attività relative al piano sperimentale abbiano consentito il riutilizzo dell'intero impianto.

- Training del personale e condivisione del progetto tra i membri dei diversi team. In particolare, è stata fondamentale la formazione di personale esterno in termini di metodologia applicata e utilizzo di strumentazione utile sia alla caratterizzazione di materia prima come misura di colore di caffè tostato, calo peso, profilo granulometrico, sia alla misura di caratteristiche di caffè in tazza quali percentuale estratti, polvere residua in tazza, concentrazione della bevanda oltre che volume e densità crema. La fase di training è risultata essere necessaria anche per lo svolgimento di attività di tostatura, macinatura, confezionamento e utilizzo dei rispettivi macchinari e strumenti;
- Approvvigionamento dei materiali di sperimentazione. È risultato necessario stilare un elenco di materiali e attrezzature che saranno utili alle attività di sperimentazione. Durante le prime settimane di attività ci si è messi in contatto con le diverse aree aziendali in modo da poter ricevere nei tempi previsti materiali come caffè verde di diversa origine, corpi capsula e lid.
- Suddivisione dell'intero numero di campioni da realizzare in sei gruppi principali diversi, l'uno dall'altro, per miscela o ciclo di tostatura in modo da ottenere:
 - Gruppo 1: miscela 1, ciclo tostatura breve;
 - Gruppo 2: miscela 1, ciclo tostatura lungo;
 - Gruppo 3: miscela 2, ciclo tostatura breve;
 - Gruppo 4: miscela 2, ciclo tostatura lungo;
 - Gruppo 5: miscela 3, ciclo tostatura breve;
 - Gruppo 6: miscela 3, ciclo tostatura lungo.

Per ciascun gruppo, definita la miscela e il ciclo di tostatura, sono state effettuate, quindi, due tostate con quenching differente, le macinature necessarie ad ottenere sei profili granulometrici diversi seguendo le linee guida del piano sperimentale e, infine, la fase di confezionamento con l'utilizzo dei due lid definiti in progettazione. Sono ottenuti per ciascun gruppo 24 campioni differenti e, realizzate, per ciascun campione, 20 repliche, per un totale di 480 capsule per gruppo.

- Schedulazione delle attività per semplificare lo svolgimento dell'intero piano sperimentale. Per ciascun gruppo è stato definito il *gantt* di attività da seguire in modo da poter schedulare le prove.

Attività di sperimentazione	Settimana 1					Settimana 2					Settimana 3				
	Lun	Mar	Mer	Gio	Ven	Lun	Mar	Mer	Gio	Ven	Lun	Mar	Mer	Gio	Ven
Assaggio crudi	■														
Tostatura	■	■													
Analisi caffè tostato		■													
Stoccaggio		■	■												
Macinatura			■	■	■										
Analisi caratteristiche macinatura					■										
Stoccaggio caffè					■	■									
Riempimento capsule in laboratorio						■	■	■							
Erogazione e analisi risposte									■	■	■	■	■		
Parametri erogazione									■	■	■	■	■		
Crema (volume, consistenza)									■	■	■				
Matrice estrazione (%brix, estratti)									■	■	■				
Redazione dei risultati													■	■	■

Figura 29 - Gantt attività giornaliera per ciascun gruppo.

Assaggio crudo

Prima dell'inizio della fase sperimentale viene svolta, in coordinamento con l'unità *sensory*, l'analisi sensoriale e la classificazione dei difetti di ciascuna varietà di crudo che verrà utilizzata nella sperimentazione.

Dei campioni di caffè prelevati dai sacchi vengono confrontati con gli standard dell'azienda e con i requisiti attesi.

I controlli di qualità consistono nella determinazione di parametri per verificare la qualità dei chicchi ricevuti come il colore, contenuto di umidità, densità dei chicchi e difetti. La fase principale del controllo qualitativo è definita *cupping* e consiste in un assaggio per infusione.

La prova di assaggio si effettua per essere certi che gli standard qualitativi ricercati siano rispettati. Dopo la tostatura del campione, si effettua il *cupping* internazionale o "alla brasiliana" su circa 5 tazze.

Le fasi del metodo del *cupping* sono:

- Valutazione generale dell'aspetto del chicco tostato;
- Macinatura dei grani di caffè per valutarne la fragranza;
- Aggiunta di acqua calda e posa di 3-5 minuti;

- Intorno ai 70 °C di temperatura, valutazione di sapore e retrogusto (Coffee Sapiens, 2018).

Caricamento crudo all'interno delle celle della tostatrice

Una volta ricevute, presso l'impianto pilota, le diverse varietà di crudo utili alla sperimentazione, si procede con il caricamento delle stesse all'interno del sistema di tostatura.

L'impianto della tostatrice utilizzata è costituito da 16 celle che vanno rifornite in fase preliminare in modo che, successivamente, sia possibile effettuare delle tostate definendo le varie miscele. Ciascuna cella può contenere fino a 200 Kg di caffè crudo e viene denominata a seconda della varietà che si intende inserire all'interno.

La fase di caricamento avviene per aspirazione da sacchi o bidoni dopo aver definito la cella di destinazione. Il tutto viene gestito dal software dedicato e controllato dall'operatore dalla cabina di comando.



Figura 30 - Caffè crudo (a sinistra) e fase di caricamento (a destra).

Tostatura

Per procedere alla fase di tostatura è necessario, tramite software dedicato, definire la miscela in termini percentuali e le modalità di esecuzione in termini di tempo e temperatura relative alle diverse fasi del processo.

In accordo con il piano sperimentale sono stati utilizzati due cicli di tostatura differenti:

- Ciclo breve con durata nominale inferiore ai 500 secondi, ma che può variare a seconda delle caratteristiche del crudo da tostare, essendo costante il grado di tostatura da ottenere e, con una temperatura di scarico di 210-220 °C.
- Ciclo lungo con durata nominale superiore ai 500 secondi anch'essa variabile con una temperatura di scarico vicina ai 200-210 °C.

La tostatrice utilizzata è equipaggiata con strumentazione utile alla fase di quenching che consente, quindi, di effettuare raffreddamento ad acqua al termine del processo tostatura definendo la quantità di acqua da utilizzare per il raffreddamento del prodotto.

Al termine di ciascuna tostatura viene prelevata una porzione di caffè tostato in grani per il quale viene fatta una misura del calo peso tramite bilancia termica e, successivamente, del grado di tostatura, ovvero del colore. Il calo peso viene misurato tramite bilancia termica calcolando la diminuzione del contenuto di umidità per differenza di peso.

Per le tostature per cui si è effettuato un quenching standard il valore di calo peso da ottenere il valore desiderato per entrambi i livelli definiti nel piano sperimentale.

Il colore del prodotto, il quale deve essere mantenuto costante per tutte le prove, viene misurato tramite colorimetro.

Se la porzione di caffè prelevata non rispetta uno dei due parametri presi in considerazione, il carico di tostatura viene interamente scartato.

Per avere un'idea sui diversi parametri di tostatura da impostare sono state effettuate, in fase preliminare, delle prove con miscele differenti per evitare consumo di prodotto che avrebbe potuto portare all'utilizzo di lotti differenti con implicazioni sul risultato dell'intero piano sperimentale.

Macinatura

Per i profili granulometrici da ottenere e per i valori puntuali di macinatura definiti si procede, tramite l'utilizzo di macina a due stadi, sita presso l'impianto pilota sopra descritto, con la fase di macinatura.

Per ciascun gruppo vengono ottenuti i sei profili granulometrici prestabiliti.

Ciascuna macinatura è ripetuta sia per i campioni con quenching standard sia con quenching aumentato.

In termini pratici raggiungere esattamente il valore predefinito risulta alquanto complicato così che per il valore di X50 corrispondente a un determinato livello del fattore è stato stabilito un margine di errore pari a circa 20 μm .

Come già descritto in precedenza la percentuale di polveri da ottenere è strettamente legata al valore di X50 definito. Si è cercato, in tal senso, di ottenere delle polveri che si discostino circa 3 punti percentuali per ciascun valore di X50.

Per ciascuna porzione di caffè macinato è stata effettuata l'analisi granulometrica che consente di ottenere, oltre alla curva granulometrica, una stima dei valori puntuali quali X10, X50, X90 e la percentuale di polveri presente.

Dopo aver centrato i valori corretti di macinatura, una quantità pari a 400 gr di caffè viene macinata e ritenuta pronta alla fase di confezionamento.

Il valore puntuale di X50 e percentuale di polveri da ottenere in un certo senso uguale per ciascun gruppo ha necessitato di diverse prove per ogni campionatura. È necessario, infatti, che per ciascun gruppo i valori di X50 e di polveri basse e alte siano sempre ripetuti con un minimo margine di discostamento.

In figura 31 è riportato un grafico delle macinature testate rappresentato dal valore di X50 sull'asse delle ascisse e dalla percentuale di polveri sulle ordinate. Il grafico fa riferimento ai valori di macinatura ottenuti durante la sperimentazione del gruppo 6 rappresentativo della miscela 1 tostata con ciclo breve. Per i restanti gruppi i valori di macinatura ottenuti risultano molto simili.

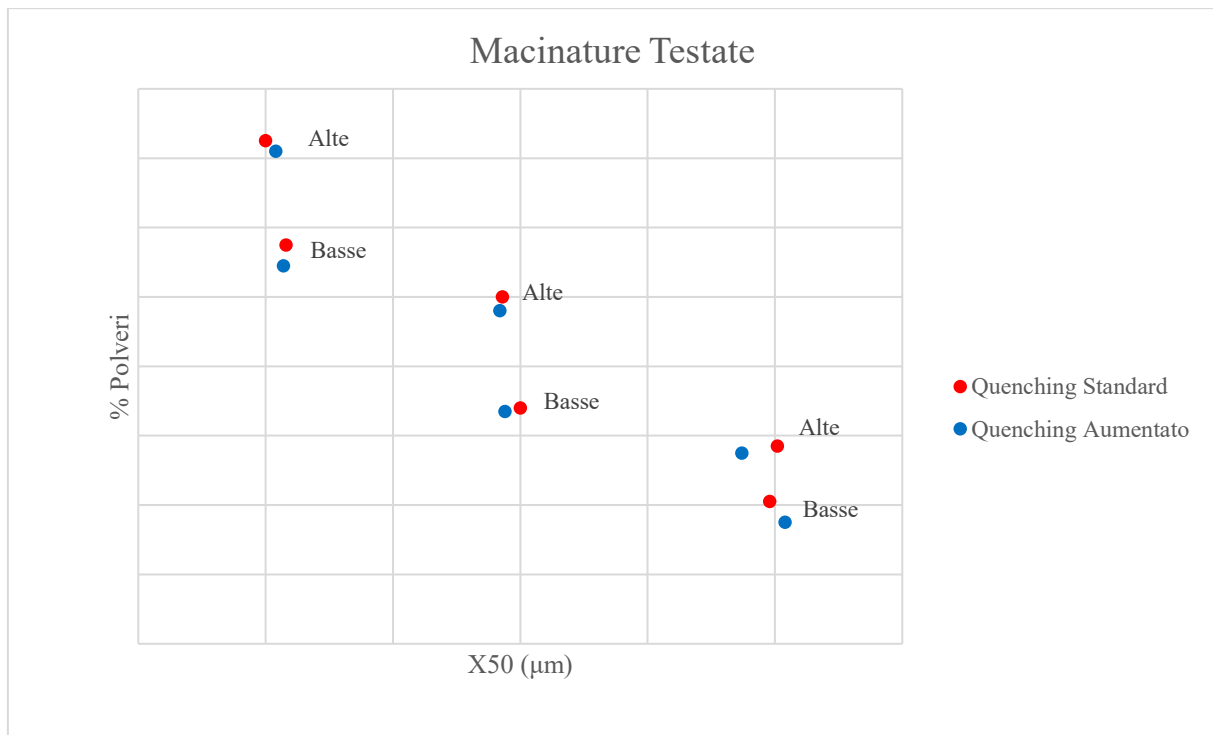


Figura 31 - Grafico macinature testate relativo al gruppo 6.

Confezionamento

In fase successiva alla macinatura si procede con il confezionamento in capsula del caffè macinato. Per ciascuna granulometria ottenuta relativa a ciascun quenching vengono confezionate, in quanto necessarie alle repliche stabilite, 20 capsule con ciascuno dei due lid considerati tra i fattori del piano sperimentale.

Avendo, per ciascun gruppo, sei profili granulometrici differenti per i due quenching effettuati, sono confezionate, in totale, considerando i due lid, 480 capsule.

In realtà, in fase sperimentale, sono confezionate 25 capsule per campione per motivi tecnici e pratici.

Il confezionamento avviene manualmente. Viene inserita una precisa quantità di caffè (grammatura standard utilizzata per i lunghi) all'interno di ciascun corpo capsula. Una volta inserita la quantità necessaria di caffè all'interno della capsula questo subisce una pressatura di circa 1,5 bar necessaria a stabilizzare il caffè all'interno. In ultima fase avviene la termosaldatura del lid sulla parte superiore del corpo capsula.



Figura 32 - Capsula confezionata manualmente.

Erogazione

L'erogazione dei campioni confezionati in laboratorio avviene tramite macchinette erogatrici domestiche.

Sono stati realizzati 24 campioni per gruppo differenti per quenching, profilo granulometrico o lid e sono necessarie, come già descritto, 20 repliche per ciascuno di essi.

Sono utilizzate due macchinette in parallelo su ciascuna delle quali vengono erogate 10 capsule per campione.

Durante le erogazioni un sistema di raccolta dati, connesso alla macchina erogatrice cablata è in grado di registrare la dose erogata, il tempo di erogazione e la pressione di infusione e, di calcolare così la portata media di erogazione e il tempo di infusione normalizzato per la dose 110 cc.

Inoltre, grazie all'utilizzo di una sonda di temperatura, è possibile registrare la temperatura al beccuccio durante la percolazione e ottenere, così, il valore medio per ciascuna erogazione.

Valutazione matrice di estrazione e crema

Come descritto in precedenza, per alcuni campioni, in seguito all'erogazione sono svolte valutazioni relative alla caratterizzazione in tazza.

Per alcuni tra i campioni con quenching aumentato e con un profilo granulometrico caratterizzato da precisi valori puntuali di X50 sono analizzati i gradi brix, la percentuale di estratti, la densità e il volume della crema tramite l'utilizzo di metodi e strumenti descritti nei paragrafi dedicati.

Redazione risultati

Una volta effettuate le erogazioni per ciascun gruppo è stato fondamentale inserire i dati raccolti all'interno di un unico file e ordinarli secondo una logica ben precisa per permettere, in fase di analisi, una facile lettura e una gestione semplificata dei dati stessi.

In riferimento al piano i diversi file relativi sono stati inseriti all'interno dei sistemi aziendali e, in tal modo, consultabili dagli interessati.

Il file di raccolta dati principale prevede dei fogli di calcolo rappresentativi del progetto e contenenti i fattori e i relativi livelli da analizzare oltre che a un elenco dettagliato dei diversi campioni da preparare distinti per miscela, ciclo di tostatura, quenching, parametri di macinatura e lid, ciascuno identificato con un proprio numero progressivo.

Una volta raccolti i dati delle erogazioni e relativi quindi al peso finale estratto, al tempo di infusione, al tempo di infusione normalizzato a 110 cc, alla portata e alla temperatura al beccuccio media questi sono inseriti in un foglio di calcolo rappresentativo del gruppo a cui si fa riferimento.

Oltre ai parametri caratterizzanti ciascun campione e oltre ai dati ricavati dalle erogazioni riferiti alle 20 repliche per ciascuno di essi vi si tiene traccia di altri parametri quali:

- Umidità e densità del crudo misurata in fase antecedente alla tostatura;
- Colore il quale è stato mantenuto fisso in un intorno;
- Curing time;
- Densità macinato;
- Data e operatore di tostatura, macinatura, confezionamento e erogazione.

Questo è stato fatto per poter avere un quadro più dettagliato delle prove sperimentali effettuate e per poter avere la possibilità di svolgere anche un'analisi della covarianza per fattori di disturbo controllabili e non controllabili.

Al termine delle prove di ciascun gruppo il team di lavoro si impegna a svolgere delle analisi esplorative di tipo qualitativo per poter iniziare a dare valore all'esperimento e dare un'idea, in un certo senso, delle relazioni che possono presentarsi tra fattori di input e variabili di risposta.

I tre grafici mostrano, in relazione al gruppo 6, innanzitutto, l'effetto del X50 (figura 33) e delle polveri (figura 34) sul tempo di erogazione: si nota come un prodotto più fine quindi con una maggiore percentuale di polveri e un minor valore di X50 tende a rallentare l'erogazione.

Viene mostrato anche l'effetto del lid utilizzato sia sul tempo di erogazione (figure 33 e 34) e sulla pressione di infusione (figura 35): con l'utilizzo del lid alternativo aumenta la velocità di erogazione e, si riduce la pressione di infusione necessaria a garantire una corretta erogazione.

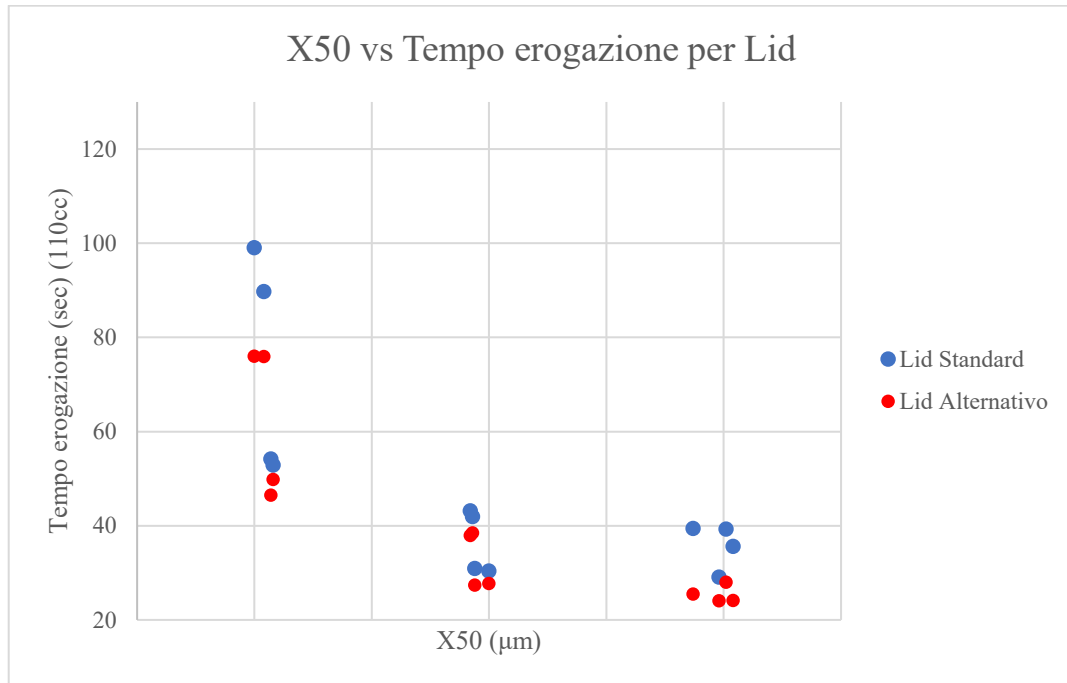


Figura 33 - Nel grafico è possibile notare l'effetto del lid sul tempo di erogazione a parità di X50.

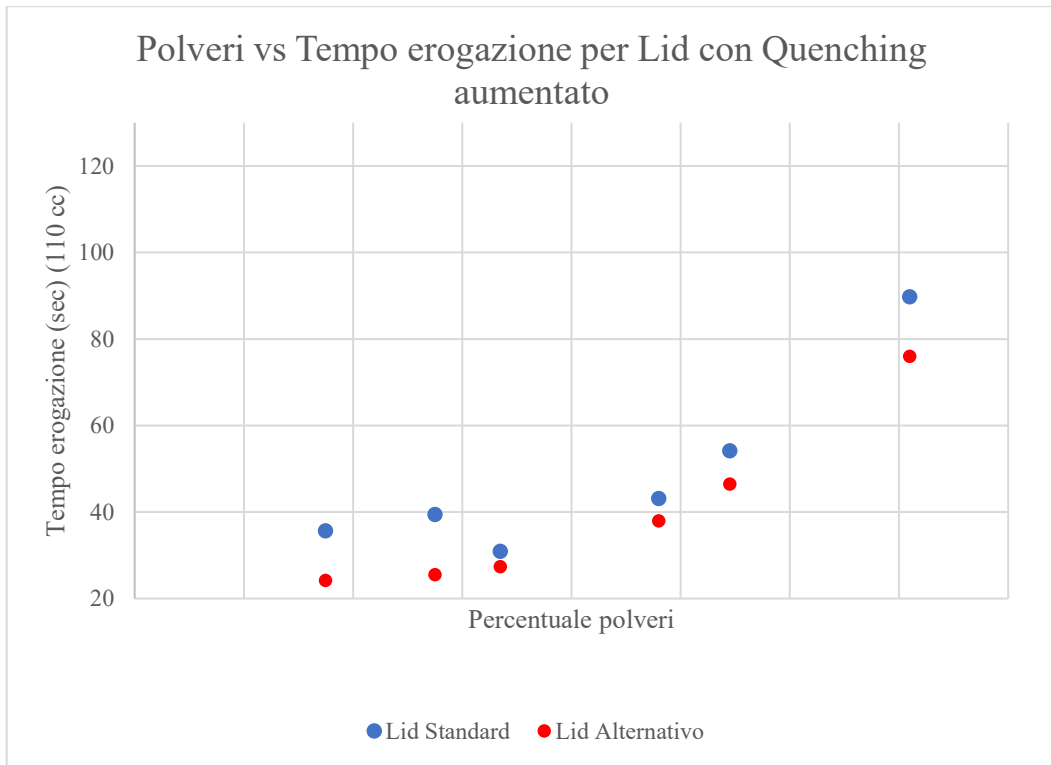


Figura 34 - Nel grafico si nota, oltre all'effetto delle polveri sul tempo di erogazione, l'effetto del lid a diversa percentuale di polveri. I campioni considerati sono rappresentativi del quenching aumentato.

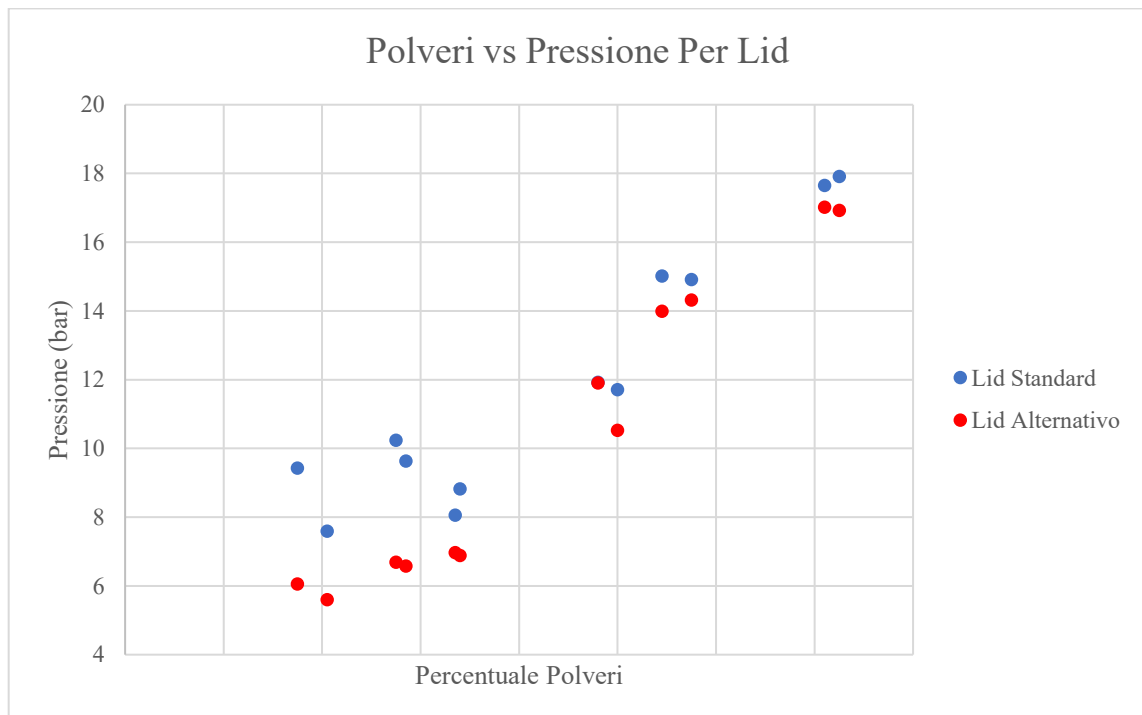


Figura 35 - Nel grafico si evidenzia una maggiore pressione di infusione necessaria all'erogazione per polveri alte e per lid standard a parità di polveri.

4.3.8. Aggiustamenti in corso d'opera e prove preliminari

È suggerito che sono spesso utili alcune prove preliminari prima di condurre le prove principali. Tali prove pilota consentono di ricevere informazioni sulla congruità del materiale sperimentale, verificare i sistemi di misura e avere una vaga idea dell'errore sperimentale, oltre che avere la possibilità di impraticarsi con la tecnica e i metodi da utilizzare (Coleman e Montgomery, 1993). Durante la realizzazione dei campioni relativi al primo gruppo sono state effettuate delle prove preliminari. Nonostante l'esperienza dei diversi team aziendali si tratta di un piano sperimentale che analizza, in alcuni casi, mix di fattori poco esplorati.

Durante le prime settimane di sperimentazione si è cercato di consolidare il piano e si è cercato di capire se la strada intrapresa fosse quella corretta e se potesse portare a dei risultati utili e significativi.

Innanzitutto, delle considerazioni sono state fatte in relazione ai profili granulometrici da analizzare e, dalle prime prove, ci si è resi conto che, per poter mettere in risalto altri fattori potesse essere utile ampliare il campo delle granulometrie testate: si è deciso, infatti, di considerare delle macinature relativamente fini per delle erogazioni di caffè lunghi per poter meglio evidenziare l'effetto di fattori migliorativi su delle erogazioni tipo espresso e, quindi, più lente.

Successivamente sono state effettuate delle erogazioni di prova per testare se la percolazione avvenisse in modo corretto e coerente considerate le granulometrie utilizzate, la grammatura utilizzata, e, in generale, il confezionamento manuale.

Altre considerazioni sono state fatte riguardo l'utilizzo delle macchinette erogatrici. Ci si è accorti in realtà che tutte le 480 erogazioni per sei gruppi non dovrebbero essere fatte su una singola macchinetta perché l'eventuale usura di quest'ultima avrebbe tolto validità al piano sperimentale. Si è deciso di utilizzare, infatti, due macchinette in parallelo del medesimo modello in modo tale che si potesse tenere in considerazione anche l'eventuale variabilità causata da queste.

4.3.9. Gestione del progetto

La gestione del progetto relativo al piano sperimentale descritto risulta tutt'altro che semplice. Ci si trova di fronte ad una elevata complessità dovuta innanzitutto, all'elevato numero di prove sperimentali, ma anche alla difficile attività di coordinamento tra i diversi attori.

In termini gestionali è chiaro come risulta fondamentale coordinare e calendarizzare le diverse prove in relazione alla disponibilità di personale, di macchinari e di strumentazione di laboratorio. In contesti aziendali risulta complicato avere una gestione lineare a causa di continui imprevisti e sviluppo di innumerevoli attività parallele.

Il progetto risulta chiaramente dispendioso in quanto necessita di una grande quantità di risorse, di personale e di tempo e risulta, inoltre, indispensabile una corretta e ordinata redazione dei risultati relativi alle sperimentazioni.

Durante l'intera esecuzione del piano sperimentale è stata tenuta traccia di tutte le attività svolte giornalmente per permettere ai diversi interessati di avere un continuo aggiornamento sullo svolgimento delle stesse.

Viene tenuta traccia, periodicamente, delle risorse e materiali impiegati tra cui:

- Quantità di caffè crudo utilizzato;
- Numero di tostature effettuate per ciascun gruppo;
- Quantità di caffè tostato utilizzato per le prove di macinatura;
- Quantità di prodotto, sia macinato sia confezionato in capsule, rimasto al termine di ogni fase;
- Personale e tempo di lavoro impiegati per ciascuna fase (tostatura, macinatura, confezionamento, erogazione, caratterizzazione in tazza).

In termini operativi sono state riscontrate diverse difficoltà relative alle diverse fasi del progetto: in fase di tostatura è risultato difficoltoso mantenere costante il colore del tostato per ciascun campione e garantire un preciso valore di calo peso a diverse miscele e a diversi cicli di tostatura, mentre in fase di macinatura risulta complicato ottenere i valori puntuali di X50 e polveri per ciascun gruppo e cercare di replicarli ogni qualvolta sia necessario.

Difficoltà di tipo operativo si sono presentate, inoltre, nel momento in cui strumentazione o spazi di laboratorio risultavano non disponibili per attività impreviste o parallele.

4.3.10. Analisi dei dati

General Linear Model

Un modello lineare generale (GLM) rappresenta quella metodologia utilizzata per lo studio di diversi modelli rappresentativi utilizzando le più comuni metodologie statistiche.

Per modello si intende una rappresentazione matematica della relazione che si verifica tra una variabile di risposta e un set di variabili indipendenti. Parlando di modelli statistici e non deterministici, bisogna tener conto della possibilità che le relazioni tra più variabili non siano

descritte perfettamente e questo è testimoniato dal fatto che è presente una variazione non spiegabile, sottoforma di residui.

Generalmente, una variabile di risposta viene rappresentata o descritta come la somma di una componente sistematica e di residui. È ovvio che alcuni modelli approssimino in modo più ragionevole la realtà rispetto ad altri e, in tal caso, lo scopo dell'analista è riuscire a trovare un modello che sia ragionevole e allo stesso tempo sufficientemente semplice da interpretare.

In un general linear model (GLM), il valore osservato della variabile dipendente y per l'osservazione i ($i=1, 2, \dots, n$) è descritto tramite una funzione lineare delle k variabili indipendenti x_1, x_2, \dots, x_k .

La relazione $y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \beta_2 x_{i2} + \dots + \beta_k x_{ik} + \varepsilon_i$ rappresenta il modello tramite il quale viene descritta la variabile di risposta y in relazione alle diverse variabili considerate in cui ε_i rappresenta il residuo per l'osservazione i .

In termini matriciali, il medesimo modello è rappresentato da $Y = X\beta + e$ in cui:

$$Y = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \dots \\ y_n \end{pmatrix}$$

rappresenta il vettore delle osservazioni della variabile dipendente,

$$X = \begin{pmatrix} 1 & x_{11} & \dots & x_{1k} \\ 1 & x_{21} & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & x_{n1} & \dots & x_{nk} \end{pmatrix}$$

è una matrice di dimensioni $n * (k + 1)$, chiamata *design matrix* la quale contiene i valori delle osservazioni relative alle variabili indipendenti e un vettore unitario corrispondente all'intercetta.

$$\beta = \begin{pmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \dots \\ \beta_k \end{pmatrix}$$

indica il vettore dei parametri da stimare inclusa l'intercetta e,

$$e = \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \dots \\ \varepsilon_n \end{pmatrix}$$

è relativo al vettore dei residui.

Comunemente si assume che i residui siano distribuiti normalmente e che siano indipendenti tra di loro.

Minitab utilizza tale approccio creando una matrice *design matrix* ricavata dai fattori quantitativi e categorici specificati e, dal modello che si decide di analizzare. Tale matrice ha un numero di righe pari al numero di osservazioni e un certo numero di blocchi di colonne corrispondente al numero dei termini inseriti nel modello. La prima colonna è per la costante ed è una colonna unitaria, ogni variabile quantitativa è rappresentata da una singola colonna mentre, per quanto riguarda le variabili categoriche il numero di colonne è pari ai gradi di libertà del fattore qualitativo, ovvero calcolato come il numero di livelli del fattore meno uno.

Successivamente, per calcolare le colonne dei termini di interazione, viene moltiplicato il numero di colonne corrispondenti ai fattori quantitativi e ai termini categorici che compaiono nell'interazione.

Ad esempio, supponendo che il fattore qualitativo A è descritto su 6 livelli e B, anch'essa variabile categorica, viene fatta variare su 3 livelli e i fattori Z e W sono variabili quantitative allora il termine di interazione $A * B * Z * W$ ha $5 * 2 * 1 * 1 = 10$ colonne.

Lo scopo delle analisi effettuate tramite l'utilizzo di general linear model è quello di ottenere un modello in grado di stimare il comportamento delle variabili di risposta o di poter effettuare predizioni.

I parametri del modello vengono solitamente stimati tramite il metodo dei minimi quadrati³ in modo tale che i parametri siano tali che la somma dei quadrati dei residui $\sum_i \varepsilon_i^2$ sia la minima ottenibile.

General linear model utilizza, quindi, un approccio tipico della regressione per *fit* il modello specificato.

Minimizzando la somma dei quadrati dei residui, la stima dei coefficienti β viene ricavata da:

³ Metodologia che ricava la funzione di regressione che riesca a minimizzare la somma dei quadrati delle distanze tra il valore stimato tramite la curva di regressione e il valore reale.

$$\hat{\beta} = (X'X)(X'X)^{-1}X'Y^4$$

Il valore predittivo, ottenibile dalla curva di regressione è dato da:

$$\hat{y}_i = \sum_{j=0}^k \hat{\beta}_j x_{ij}$$

o in termini matriciali:

$$\hat{Y} = X\hat{\beta}$$

I valori predetti sono i valori della variabile dipendente che si otterrebbero se il modello fosse una rappresentazione perfetta della realtà. La differenza tra i valori predetti e quelli reali osservati viene rappresentata dai residui: $\hat{\epsilon}_i = y_i - \hat{y}_i$.

Analisi della varianza

La variabilità dei dati può essere misurata come la somma dei quadrati totale:

$$SS_t = \sum_i (y_i - \bar{y}_i)^2$$

Tale misura può essere scomposta dalla somma dei quadrati del modello e la somma dei quadrati dei residui:

$$SS_t = SS_{model}^5 + SS_e$$

Che rappresentano rispettivamente la variazione spiegata dai fattori, quindi, la variazione delle risposte previste dal modello rispetto alla media delle prove sperimentali e, la variazione dovuta all'errore e, quindi, non spiegata dal modello che indica la variazione delle risposte osservate rispetto ai valori previsti dal modello:

⁴ Per la dimostrazione si rimanda a un approfondimento.

⁵ Minitab suddivide la somma dei quadrati del modello nella quantità di varianza spiegata da ciascun fattore utilizzando la somma dei quadrati sequenziale o la somma dei quadrati adjusted.

La somma dei quadrati sequenziale dipende dall'ordine in cui i fattori sono inseriti nel modello. In tal modo il contributo del fattore sulla somma dei quadrati del modello dipende dai fattori precedentemente inseriti nel modello.

La somma dei quadrati adjusted (Adj SS) non dipende, invece, dall'ordine in cui i fattori sono inseriti e rappresenta la porzione di somma dei quadrati spiegata dai fattori, avendo tutti i fattori nel modello senza dipendere dall'ordine di inserimento.

$$SS_t = \sum_i (\hat{y}_i - \bar{y}_i)^2 - (y_i - \hat{y}_i)^2$$

Più il modello è in grado di *fittare* meglio i dati, minore sarà il valore di SS_e .

Solitamente, un'analisi della varianza riassume la suddivisione della variabilità totale restituendo anche la stima dei quadrati medi (MS) calcolati come il rapporto tra la somma dei quadrati e i rispettivi gradi di libertà⁶. Il rapporto tra la somma dei quadrati dei residui e i rispettivi gradi di libertà fornisce una stima della varianza σ^2 che altro non è che la varianza dei residui.

Un test oggettivo sull'intero modello consiste nel valutare l'ipotesi che i coefficienti $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k$ siano pari a zero. Esso viene effettuato tramite valutazione della statistica F calcolata in tal modo:

$$F = \frac{MS_{model}}{MS_e}$$

La quale viene comparata con una distribuzione F avente k, n-1-k gradi di libertà.

Generalmente, un software di calcolo statistico presente in un output di risultati anche il valore p-value il quale aiuta l'analista e lo sperimentatore a riconoscere più facilmente un fattore o un'interazione significativa. Utilizzato nei test di ipotesi, il p-value indica la probabilità di ottenere una statistica di test che sia almeno pari al valore calcolato, ipotizzando che l'ipotesi nulla sia vera. In semplici termini, esso si riferisce al rischio a cui si andrebbe incontro rifiutando l'ipotesi nulla la quale afferma come i coefficienti del modello siano nulli.

Solitamente un p-value superiore alla soglia del 5% porterebbe l'analista a rifiutare l'ipotesi nulla.

Una misura descrittiva che indica la bontà del modello ed è atta a spiegare la percentuale di variabilità nella variabile di risposta che è in qualche modo spiegata dal modello è R^2 .

⁶ Utilizzando GLM Minitab attribuisce un grado di libertà ai fattori quantitativi mentre, in riferimento ai fattori qualitativi il numero di gradi di libertà è calcolato come il numero di livelli relativi al fattore meno uno. I gradi di libertà per la somma totale dei quadrati sono n-1 in cui n rappresenta il numero totale di prove effettuate.

I gradi di libertà da attribuire ai residui, sono invece calcolati per differenza tra i gradi di libertà di SS_t e i gradi di libertà di ciascun fattore quantitativo o qualitativo.

Tale indice è calcolato come il rapporto tra la somma dei quadrati del modello e la somma dei quadrati totale e, più alto è il valore, più il modello è in grado di fittare i dati.

$$R^2 = \frac{SS_{model}}{SS_t}$$

Quando si cerca di modellizzare dei dati con modelli diversi è utile basarsi sul valore di R^2 per determinare quale modello preferire.

Tuttavia, il valore di R^2 aumenta ogni qualvolta un nuovo termine viene inserito nel modello e proprio per questo motivo, spesso conviene effettuare paragoni utilizzando l'indice R^2_{Adj} il quale valore risulta diminuire quando dei termini irrilevanti vengono inseriti all'interno del modello (Olson, 2002).

$$R^2_{Adj} = 1 - \frac{MS_e}{\frac{SS_t}{n-1}}$$

Algoritmi di regressione

La scelta della selezione delle variabili da includere all'interno di un modello di regressione è uno dei principali problemi che vengono riscontrati nelle applicazioni statistiche.

Solitamente, il problema riguarda la selezione di un sottoinsieme di variabili quando si vuole modellare la relazione tra una variabile di interesse e un sottoinsieme di potenziali variabili o variabili predittive, ma c'è incertezza su quali variabili utilizzare.

In molti casi in cui si ha un elevato insieme di variabili indipendenti, può risultare difficoltoso costruire un buon modello. Per tale motivazione, spesso, la variabile dipendente Y viene valutata solo sulla base di una parte dell'insieme di fattori o interazioni che la influenzano. A tal fine diverse metodologie e algoritmi consentono di includere, all'interno del modello di regressione, solo le variabili indipendenti che più influenzano la risposta senza, tuttavia, ridurre la precisione del modello.

Stepwise method

L'algoritmo stepwise si occupa di effettuare una selezione di variabili maggiormente significative tra quelle proposte aggiungendole o eliminandole dal modello in relazione alla statistica F . Il primo step nella regressione stepwise è calcolare la statistica F e il p -value per ciascuna variabile del modello.

La statistica F per ciascuna variabile viene calcolata come il rapporto tra la differenza tra SS_e per il modello che non contiene la variabile considerata e SS_e calcolato includendo la variabile e divisa per i gradi di libertà relativi e MS_e per il modello che include la variabile.

$$F = \frac{\frac{(SS_{e,k-x} - SS_{e,k})}{DF_x}}{MS_{e,k}}$$

Dove $SS_{e,k-x}$ indica SS_e per il modello che non include la variabile x considerata e DF_x indica i gradi di libertà della variabile da escludere dal modello.

In termini di p-value viene rimossa dal modello quella variabile col valore maggiore di p-value che sia più grande dell'errore di prima specie α considerato (in genere 5%) prima di procedere con lo step successivo.

Se non può più essere rimossa alcuna variabile, la procedura si occupa di aggiungerne di nuove.

Viene nuovamente calcolata la statistica F per ciascuna variabile in modo simile al precedente:

$$F = \frac{\frac{(SS_{e,k} - SS_{e,k+x})}{DF_x}}{MS_{e,k+x}}$$

Dove $SS_{e,k+x}$ e $MS_{e,k+x}$ sono relativi, questa volta, a SS_e e MS_e calcolati dopo che la variabile di interesse x è aggiunta al modello.

Se il p-value corrispondente alla statistica F per ciascuna variabile è minore del valore α specificato, viene aggiunta al modello la variabile con il più basso valore di p-value. Quando nessun'altra variabile può essere inserita o rimossa dal modello, la procedura stepwise conclude.

Forward selection

La procedura forward selection aggiunge variabili al modello usando la stessa procedura utilizzata per l'algoritmo stepwise. Una volta aggiunta, una variabile, però, non è più rimossa. La procedura termina quando nessun'altra variabile ha un p-value minore del valore specificato.

Backward elimination

Tale algoritmo determina quale variabile non deve essere rimossa dal modello. La procedura comincia analizzando il modello che contiene tutte le variabili e le interazioni e,

successivamente, procede eliminando una variabile alla volta usando i medesimi step presenti nella procedura stepwise. Nessuna variabile può, però, essere reintrodotta nel modello una volta che viene rimossa. La procedura termina quando nessun'altra variabile inclusa nel modello restituisce un p-value maggiore del valore α specificato.

Metodologia e procedura di analisi

Con riguardo al piano sperimentale progettato per l'azienda Luigi Lavazza S.p.A. si è deciso di procedere scegliendo, tra tutte, l'applicazione della metodologia di cui sopra.

Studiando gli effetti dei fattori sulle diverse variabili di risposta tramite un modello lineare generale (GLM) è possibile fare delle valutazioni più generali soprattutto in quei casi in cui il piano sperimentale non è perfettamente bilanciato, a causa delle diverse approssimazioni a cui bisogna sottostare durante le prove sperimentali e, inoltre, il numero di livelli non è il medesimo per tutti i fattori.

L'analisi del piano sperimentale viene effettuata tramite l'utilizzo di Minitab optando, quindi, per un'analisi della varianza e, in particolare un GLM.

Una volta definite le variabili di risposta del piano, vengono definiti i fattori quantitativi e le variabili qualitative. Nel gergo di Minitab, in modo fuorviante, vengono indicate come "factors" quelle variabili di tipo categorico e quindi qualitative mentre, ciò che deve essere raggruppato come "covariates" fa riferimento alle variabili continue.

Una volta definiti i fattori indipendenti e le variabili di risposta si procede con la definizione del modello.

È preferibile un modello del primo ordine che contenga tutti i fattori e le interazioni di secondo ordine tra i fattori stessi in modo da avere anche una valutazione di eventuali effetti congiunti.

Minitab, tramite l'utilizzo di GLM, in modo del tutto automatico, codifica le variabili categoriche in modo tale da poterle includere nell'equazione di regressione. I coefficienti che saranno ottenuti relativi alle variabili categoriche sono da interpretare in relazione a un livello di riferimento.

All'interno di *design matrix*, Minitab crea una colonna assegnando 1 ogni qualvolta la riga corrisponde al gruppo della colonna.

In alcune specifiche condizioni risulta particolarmente utile codificare anche le variabili quantitative continue e quindi, non categoriche. Codificando i fattori, ad esempio centrandoli rispetto alla media 0, scegliendo un livello superiore e uno inferiore in modo da effettuare

una trasformazione lineare della scala tra -1 e 1, viene ridotta la multicollinearità tra i fattori e aumenta la precisione con cui i coefficienti vengono stimati. Tale approccio viene suggerito nel momento in cui il modello contiene fattori altamente correlati tra di loro, contiene termini di ordine superiore al primo o contiene termini di interazione. I coefficienti così stimati rappresentano, quindi, la variazione attesa nella risposta dato un cambiamento di una unità della variabile.

Infine, prima di procedere con l'analisi della varianza e la stima del modello di regressione viene definito l'algoritmo di regressione da utilizzare tra quelli sopra descritti ovvero, stepwise method, backward elimination o forward selection e il rispettivo valore di α .

La logica di scelta dell'algoritmo parte dalla valutazione della bontà del modello ottenuto e quindi, del valore dell'indice R_{Adj}^2 . La procedura che restituisce il più alto valore di R_{Adj}^2 avrà stimato il modello migliore che sarà, quindi, quello definitivo.

Dall'output relativo all'analisi della varianza vengono visualizzati, quindi, solamente i fattori e le interazioni che siano significative. Da questi termini verrà, successivamente, stimato il modello di regressione finale.

Durante la scelta dell'algoritmo da utilizzare per l'individuazione dei fattori maggiormente significativi Minitab dà la possibilità di ottenere, al termine della procedura, un modello che sia gerarchico.

In un modello gerarchico, tutti i termini di ordine inferiore che comprendono anche termini di ordine superiore vengono visualizzati nel modello. Ad esempio, un modello che include l'interazione A*B è gerarchico solamente se include anche i termini A e B.

Solitamente, se sono presenti dei fattori casuali, è sempre suggerito utilizzare un modello lineare generale che sia gerarchico. Inoltre, Minitab suggerisce di *fit* un modello gerarchico nel momento in cui vengano codificati i fattori quantitativi per ottenere equazioni in unità naturali o, *uncoded*. La codifica dei fattori quantitativi di cui sopra, infatti, porta a restituire delle curve di regressione in unità codificate (*coded units*) se il modello della curva di regressione non risulta di tipo gerarchico.

4.3.11. Discussione dei risultati

Tempo infusione

Una volta definita e consolidata una metodologia di analisi dei dati Minitab restituisce, in output, i risultati dell'analisi della varianza, evidenziando quali fattori e quali interazioni

risultano significative. Va evidenziato come l'utilizzo di un algoritmo di regressione consente di ottenere un output contenente solamente le variabili significative.

Per semplicità di lettura è riportato solo ciò che è stato ritenuto maggiormente significativo:

General Linear Model

Method

Factor coding (-1; 0; +1)

Covariate standardization

Levels coded to -1 and +1 //Nascosti i valori codificati

Stepwise Selection of Terms

α to enter = 0,05; α to remove = 0,05

Factor Information

Factor	Type	Levels	Values
Miscela	Fixed	3	Miscela1; Miscela2; Miscela3
Macchinetta	Fixed	2	Macchinetta1; Macchinetta2
Tipo lid	Fixed	2	Alternativo; Standard

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Tempo tostatura	1	20443	20443	182,35	0,000
Calo peso tostato	1	7538	7538	67,24	0,000
X50	1	456	456	4,07	0,044
Polveri	1	125457	125457	1119,07	0,000
Miscela	2	99027	49514	441,66	0,000
Tipo lid	1	56159	56159	500,93	0,000
Tempo tostatura*calo peso tostato	1	3646	3646	32,53	0,000
Tempo tostatura*X50	1	9031	9031	80,55	0,000
Calo peso tostato*X50	1	9969	9969	88,92	0,000
X50*Polveri	1	103708	103708	925,06	0,000
Tempo tostatura *Miscela	2	7617	3808	33,97	0,000
Tempo tostatura*Macchinetta	1	684	684	6,10	0,014
Tempo tostatura *tipo lid	1	1986	1986	17,71	0,000
Calo peso tostato*Miscela	2	2487	1244	11,09	0,000
X50*Miscela	2	2144	1072	9,56	0,000
X50*Macchinetta	1	459	459	4,09	0,043
X50*Tipo lid	1	2789	2789	24,87	0,000
Polveri*Miscela	2	15089	7545	67,30	0,000
Polveri*Tipo lid	1	5174	5174	46,15	0,000
Miscela*Macchinetta	2	1009	504	4,50	0,011
Miscela*Tipo lid	2	3231	1615	14,41	0,000
Error	2903	325451	112		
Total	2931	1453414			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)
10,5881	77,61%	77,39%

Come descritto nei paragrafi precedenti viene seguita una metodologia basata su uno studio tramite General Linear Model (GLM). Minitab riassume le codifiche dei fattori continui (*covariates*) e delle variabili categoriche (*factors*).

Si evidenzia la scelta dell'algoritmo *stepwise* con un valore di α del 5%. Tra gli algoritmi di regressione proposti viene considerato quello che restituisce un valore di R_{Adj}^2 più alto e che sia, quindi, più in grado di spiegare la varianza delle variabili di risposta tramite il modello.

Dopo aver descritto i diversi fattori categorici e i rispettivi livelli viene così mostrato il risultato dell'analisi della varianza nel quale vengono evidenziati i fattori e le interazioni maggiormente significative, ovvero, che presentano un valore di p-value inferiore a 0,05.

Tra i fattori significativi, che più influenzano la variabile tempo di infusione sono presenti i fattori di macinatura. Generalmente, una macinatura più fine tende a rallentare il processo di percolazione.

Altri fattori significativi sono rappresentati dalla miscela, dal tempo di tostatura, dal quenching e dal lid utilizzato in fase di confezionamento.

Ciò sta ad evidenziare un comportamento diverso del prodotto durante l'erogazione derivante da utilizzo di miscele differenti utilizzando varietà o percentuali diverse.

Anche in fase di tostatura è possibile intervenire sui diversi parametri per influenzare in modo più o meno accentuato il risultato finale dell'erogazione. Caratteristiche differenti in termini di tostatura e modalità di raffreddamento prodotto tendono a restituire tempi di erogazione sostanzialmente differenti.

Infine, tra i fattori considerati, anche la tipologia di lid utilizzato può portare a dei risultati di percolazione differenti e che porteranno quindi, a una resa in tazza differente.

Una nota positiva di questa prima analisi di significatività dei fattori è rappresentata dall'assenza della variabile macchinetta tra i fattori maggiormente influenti. Essa infatti è presente solamente nei termini di interazione con un effetto relativamente inferiore rispetto alla media⁷.

L'analisi della varianza è in grado, quindi, di restituire un primo screening dei fattori mettendo in risalto quelli che più hanno effetto sulla variabile di risposta. Una volta individuati tali fattori si è in grado di procedere con l'analisi delle curve di regressione che siano in grado di quantificare l'effetto delle singole variabili. Si ricorda come l'analisi della varianza e, l'algoritmo di regressione, restituiscano solo quelle variabili e interazioni i cui coefficienti delle equazioni di regressione siano diversi da zero.

⁷ L'effetto viene valutato relativamente al valore dei coefficienti presenti nelle curve di regressione.

I grafici relativi agli effetti medi dei fattori e i grafici relativi alle interazioni chiariscono sostanzialmente la situazione. I primi mostrano l'effetto dei diversi fattori passando da un livello ad un altro, mentre i secondi mostrano come l'effetto di un fattore cambia in relazione ad un altro.

È facile osservare come facendo variare un solo un fattore per volta è impossibile studiare l'effetto di interazioni in quanto non si lascia loro alcuna possibilità di manifestarsi.

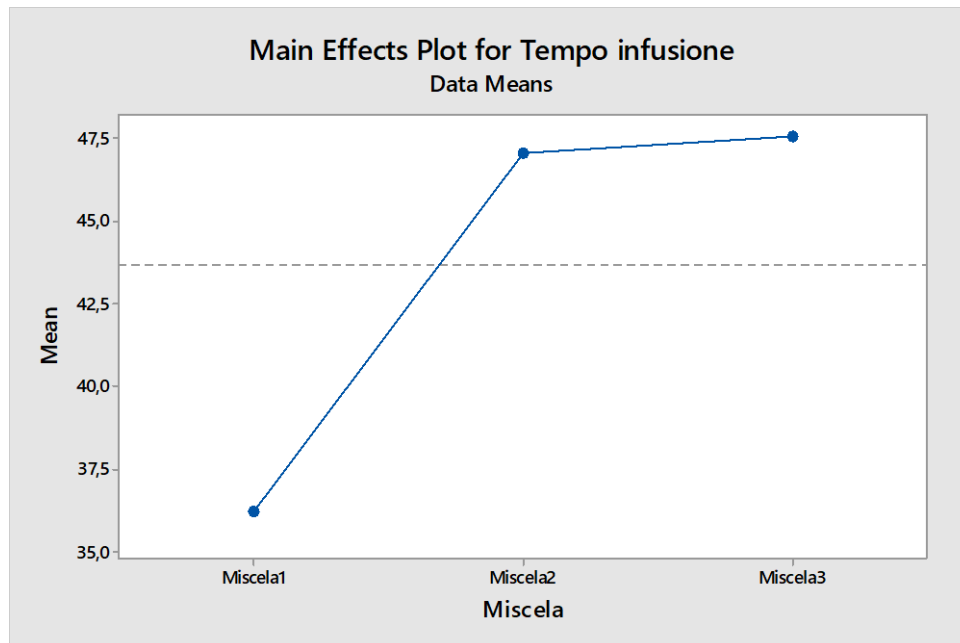


Figura 36 - Grafico effetti principali relativo al fattore Miscela. Si nota l'effetto sul tempo di infusione al variare della miscela. In particolare, la miscela 1, mediamente restituisce dei risultati migliori in termini di erogazione.

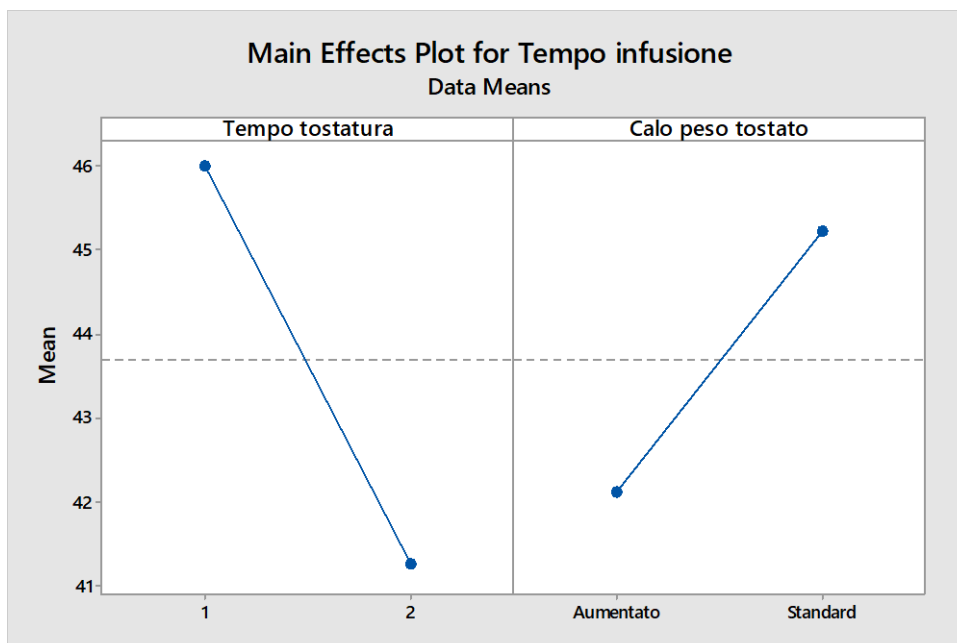


Figura 37 - Grafico effetti principali relativo ai fattori Tempo tostatura e Calo peso. In fase di tostatura è notevole l'effetto da attribuire alla durata del processo e alla modalità di raffreddamento del prodotto tostato.

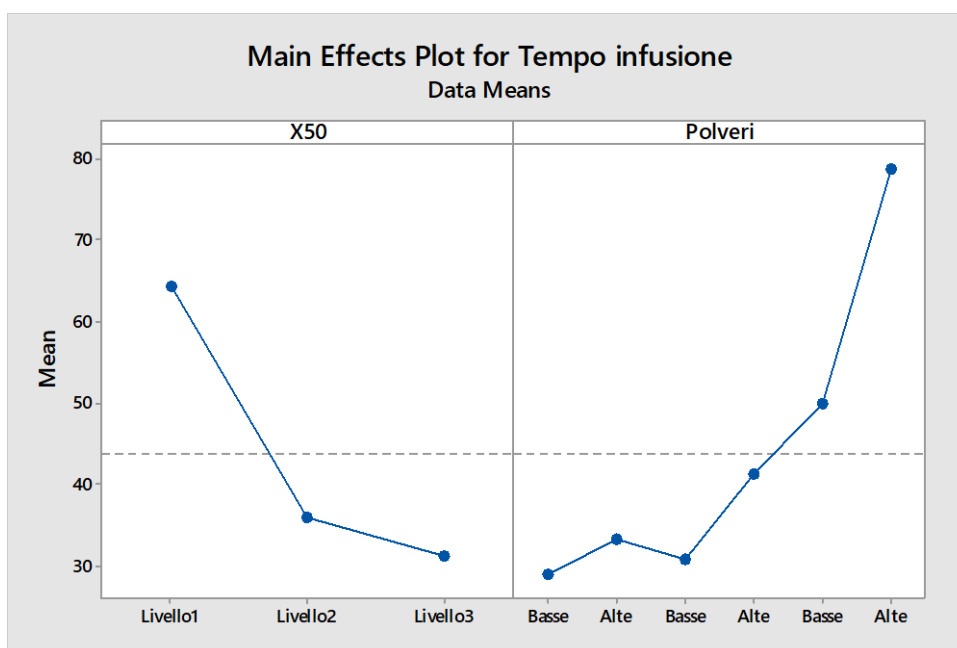


Figura 38 - Grafico effetti principali relativo alle variabili di macinatura. Dai due grafici si nota una correlazione tra i due fattori X50 e Polveri e come, un prodotto macinato più finemente tendi a rallentare la percolazione.

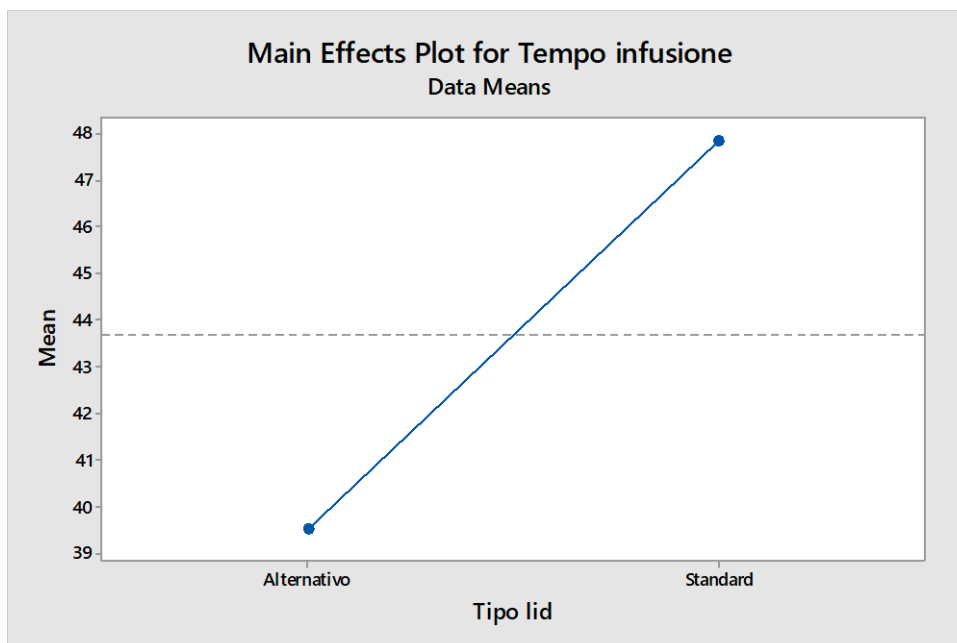


Figura 39 - Grafico effetti principali relativo al fattore Lid. L'utilizzo di un lid alternativo risulta favorire mediamente l'erogazione del caffè in tazza.

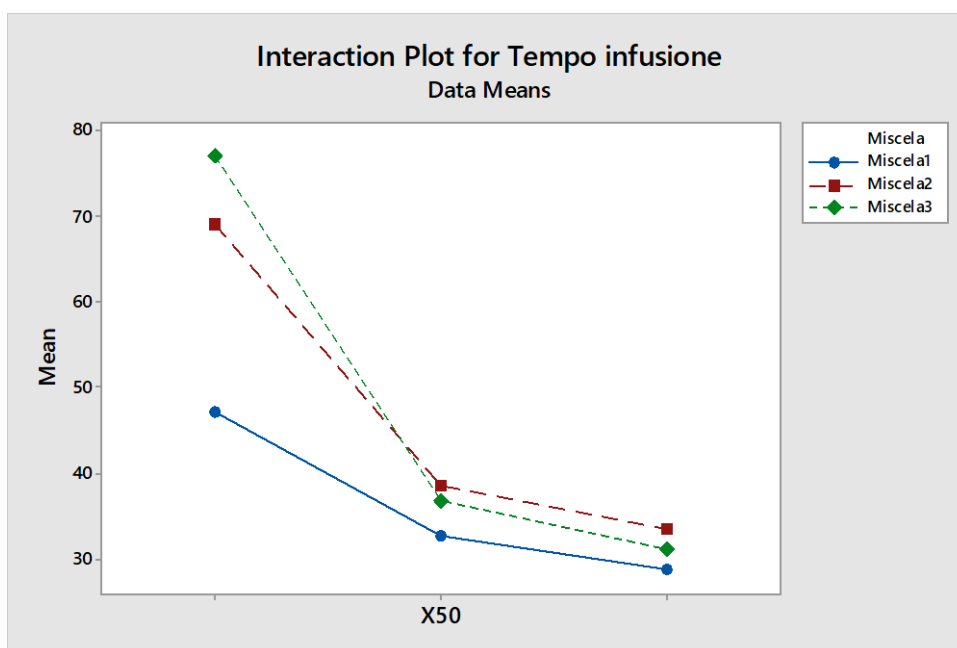


Figura 40 - Grafico di interazione tra i fattori X50 e Miscela. L'andamento non parallelo delle due rette indica un'interazione tra i due fattori. L'effetto di variazione della macinatura (X50) sul tempo di infusione è maggiore in presenza di miscela 3 piuttosto che di altre. Ciò è a conferma che l'interazione tra i due fattori risulta significativa.

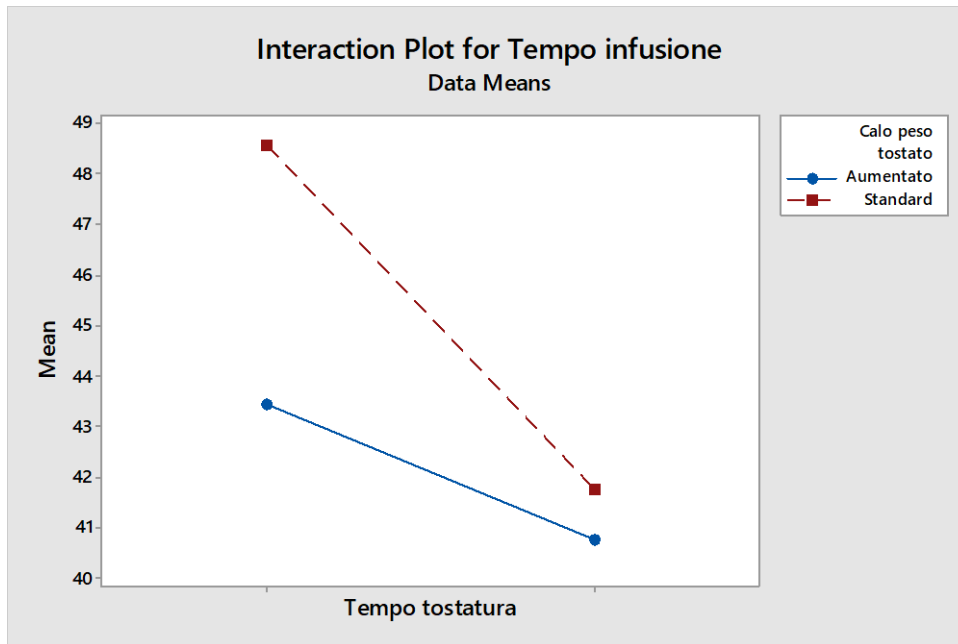


Figura 41 - Grafico di interazione tra i fattori Tempo tostatura e Calo peso. La variazione del tempo di tostatura ha un effetto maggiore se viene applicato un raffreddamento standard.

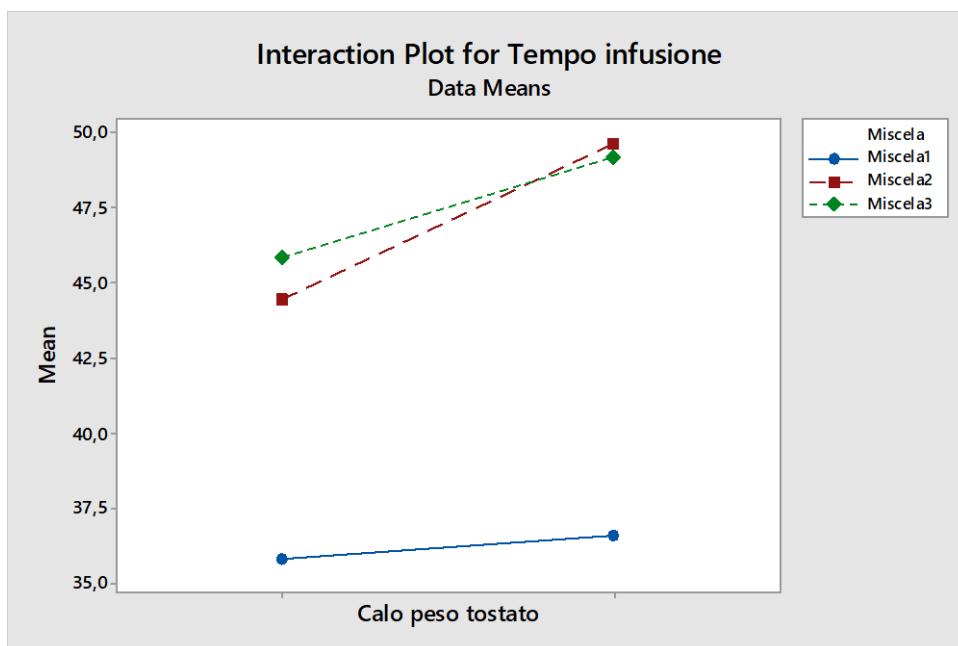


Figura 42 - Grafico di interazione tra i fattori Calo peso e Miscela. L'effetto del quenching sul caffè tostato è notevole in caso di utilizzo di miscela 2. L'effetto è poco apprezzabile nelle due alternative.

Pressione infusione

General Linear Model

Method

Factor coding (-1; 0; +1)

Covariate standardization

Levels coded to -1 and +1 //Nascoste le codifiche per non indicare i livelli dei fattori

Stepwise Selection of Terms

α to enter = 0,05; α to remove = 0,05

Factor Information

Factor	Type	Levels	Values
Miscela	Fixed	3	Miscela1; Miscela2; Miscela3
Macchinetta	Fixed	2	Macchinetta1; Macchinetta2
Tipo lid	Fixed	2	Alternativo; Standard

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Tempo tostatura	1	137,9	137,9	32,11	0,000
Polveri	1	32152,4	32152,4	7484,77	0,000
Miscela	2	1415,6	707,8	164,77	0,000
Macchinetta	1	30,5	30,5	7,11	0,008
Tipo lid	1	2345,7	2345,7	546,06	0,000
Tempo tostatura*Calo peso tostato	1	72,2	72,2	16,80	0,000
Tempo tostatura*X50	1	138,6	138,6	32,26	0,000
Tempo tostatura*Polveri	1	112,9	112,9	26,27	0,000
Calo peso tostato*X50	1	199,7	199,7	46,50	0,000
Calo peso tostato*Polveri	1	72,1	72,1	16,79	0,000
X50*Polveri	1	1070,5	1070,5	249,19	0,000
Tempo tostatura*Miscela	2	220,4	110,2	25,65	0,000
Tempo tostatura*Macchinetta	1	55,1	55,1	12,82	0,000
Calo peso tostato*Miscela	2	32,2	16,1	3,74	0,024
Calo peso tostato*Macchinetta	1	35,0	35,0	8,16	0,004
Calo peso tostato*Tipo lid	1	65,6	65,6	15,27	0,000
X50*Miscela	2	660,4	330,2	76,87	0,000
X50*Macchinetta	1	75,4	75,4	17,56	0,000
X50*Tipo lid	1	450,7	450,7	104,92	0,000
Miscela*Macchinetta	2	134,4	67,2	15,64	0,000
Macchinetta*Tipo lid	1	42,5	42,5	9,90	0,002
Error	2905	12479,0	4,3		
Total	2931	52618,2			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)
2,07261	76,28%	76,07%

Discorso analogo viene fatto per quanto riguarda lo studio sulla pressione di infusione e al relativo output a seguito di analisi dei dati.

Tra i fattori significativi si nota la presenza della macchinetta che, evidentemente, modula in modo diverso la pressione di infusione e l'assenza del fattore X50. Tuttavia, l'effetto di quest'ultimo viene sicuramente nascosto dall'effetto delle polveri, fattore significativo, in quanto le due variabili sono strettamente dipendenti.

Anche in questo caso la tostatura ha un effetto significativo sulla variabile di risposta, ma, evidentemente, la fase di quenching non influenza la pressione di erogazione. Analoghe considerazioni fatte per il tempo di infusione possono essere ripetute per la miscela di crudi utilizzata e per il lid usato in fase di confezionamento.

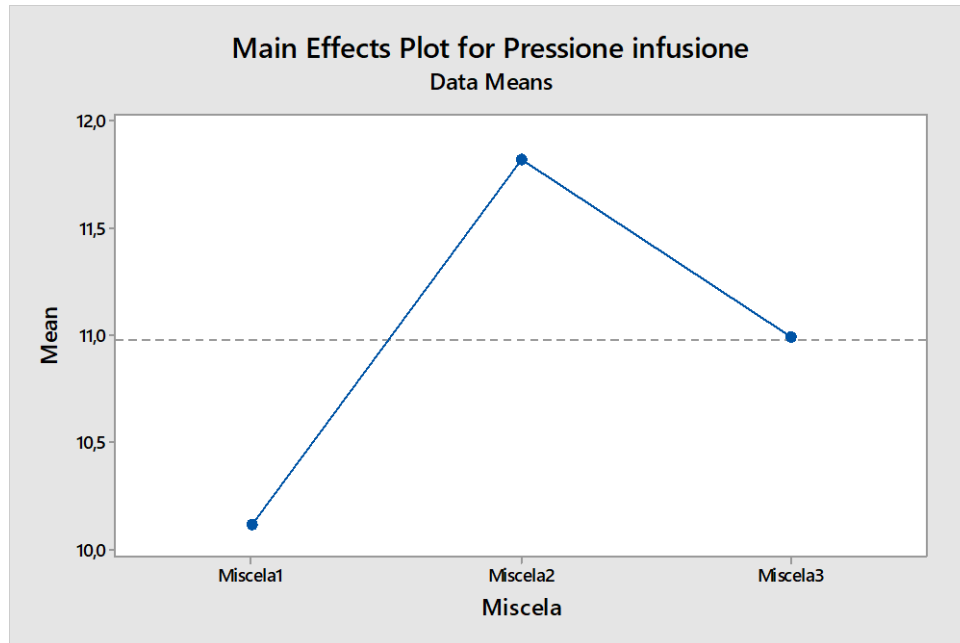


Figura 43 - Grafico effetti principali relativo al fattore Miscela. Si nota l'effetto sulla pressione media al variare della miscela. In particolare, la Miscela 2, mediamente restituisce dei valori di pressione più alti.

Può essere sottolineato come nonostante la miscela 3 restituisca una media dei tempi di erogazione più lunghi rispetto agli altri due livelli del medesimo fattore, risultati diversi sono presentati per la pressione di infusione. Questo dimostra come non sempre una pressione di infusione minore porti a dei tempi di erogazione più brevi.

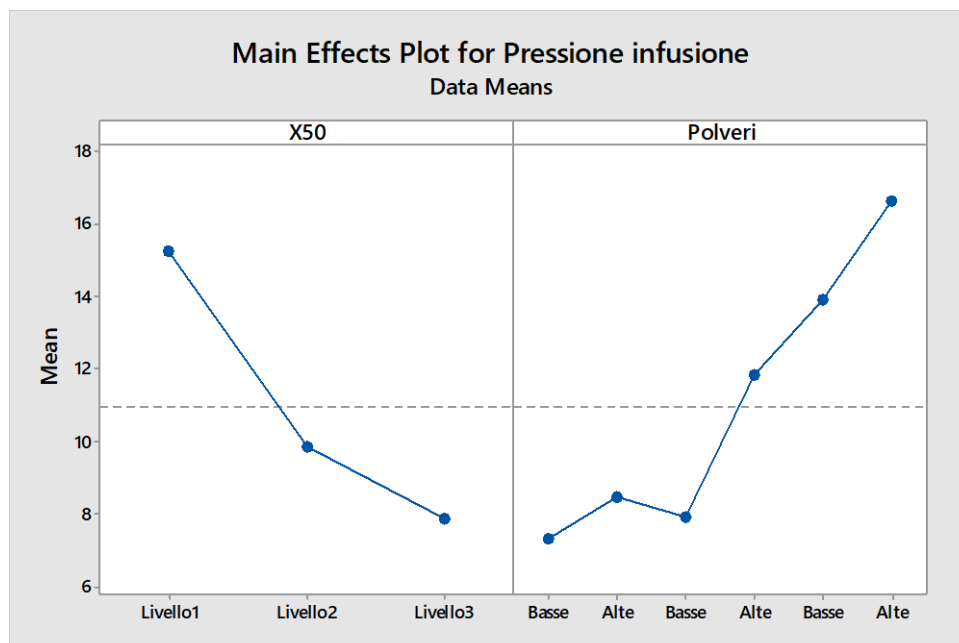


Figura 44 - Grafico effetti principali relativo alla macinatura. Si nota un andamento simile dei due grafici che conferma la stretta correlazione tra i due fattori. Il comportamento al variare dei livelli di ciascuno dei due fattori è simile a quello analizzato per il tempo di infusione.

Dalla figura 44 si nota comunque un effetto del fattore X50 sulla pressione di erogazione. Riguardando l'analisi della varianza, l'effetto non risulta significativo, ma come descritto in precedenza risulta evidente come l'analisi non restituisca significatività del fattore X50 in quanto l'effetto potrebbe essere annegato da quello delle polveri a causa della stretta correlazione.

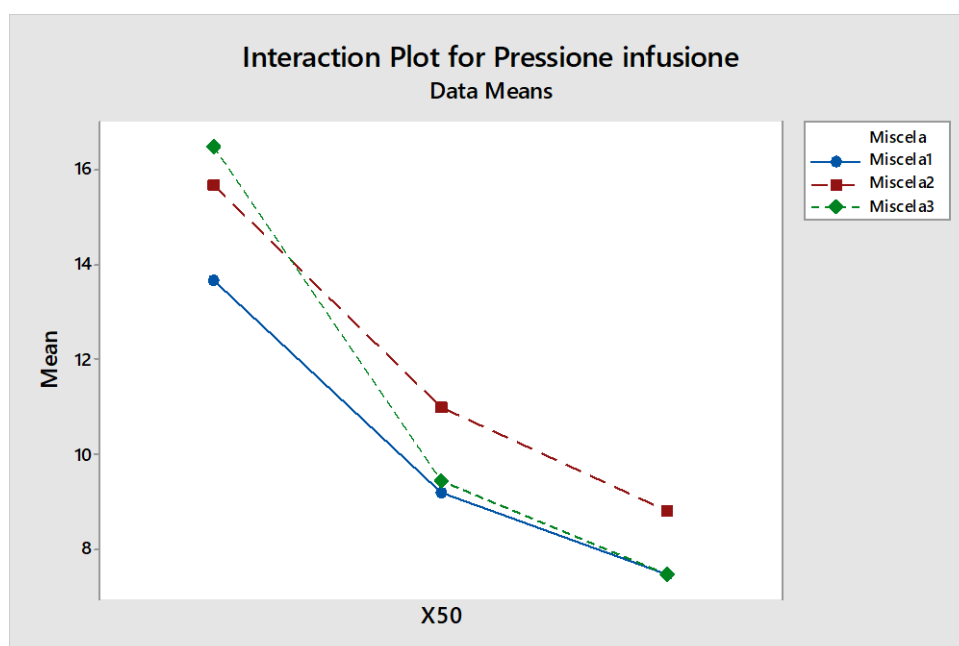


Figura 45 - Grafico di interazione tra i fattori X50 e Miscela. Le curve incrociate confermano una forte interazione tra i due fattori analoga a quella vista sul tempo di infusione. L'effetto del fattore X50 è maggiore in presenza della miscela 3.

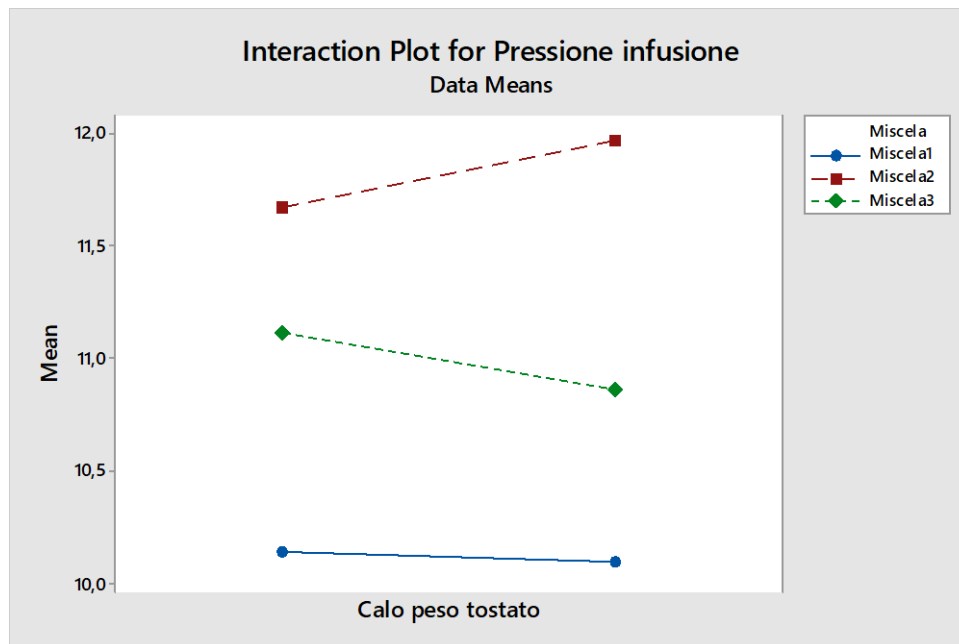


Figura 46 - Grafico di interazione tra i fattori Calo peso e miscela. È evidente un'interazione significativa tra i due fattori. L'effetto del calo peso dipende sensibilmente dalla miscela utilizzata.

Le analisi effettuate mostrano, sia per il tempo di infusione, che per la pressione di erogazione, dei risultati molto rilevanti. È di fondamentale importanza una caratterizzazione del processo in ottica di ottimizzazione dello stesso, cioè utile alla determinazione della regione dei fattori che porti alla migliore risposta possibile.

4.3.12. Sviluppi futuri

La predisposizione e l'analisi del piano sperimentale mirano a uno studio e un'ottimizzazione di una determinata tipologia di prodotto.

È utile, tuttavia, sottolineare come in tal modo si ha la possibilità di avere una completa mappatura del processo e un completo dominio dei fattori messi in gioco.

Ciò che deriva dal lavoro di ricerca è applicabile a nuove tecnologie, a prodotti in fase di progettazione e prodotti già in fase di industrializzazione. L'analisi dei risultati della sperimentazione non solo fornisce delle linee guida da utilizzare sui prodotti sotto esame, ma anche la possibilità di predire il comportamento di un qualsiasi prodotto finito, anticipare le aspettative a parità di fattori e poter determinare su quali variabili di processo intervenire per ottenere dei miglioramenti su determinati prodotti.

Il seguente lavoro di ricerca pone le sue conclusioni su una validazione dei modelli generati tramite ulteriori prove sperimentali e su prove da effettuare presso gli stabilimenti produttivi

partendo da ciò che è stato appreso dalla sperimentazione di laboratorio tenendo conto delle possibili approssimazioni.

Sviluppi futuri riguardano, quindi:

- Validazione del modello tramite sperimentazione e prove di controllo;
- Prove in stabilimento con riguardo a ciò che è stato appreso durante le fasi di sperimentazione sottostando ai diversi vincoli produttivi;
- Analisi di resa in tazza tramite lo studio e la valutazione di °brix, percentuale di estratti, crema e analisi sensoriale.

4.4. Piano sperimentale: Degassaggio caffè macinato

4.4.1. Formulazione del problema

Il degassaggio rappresenta, soprattutto nella produzione di caffè in capsule, una fase molto delicata in quanto è spesso causa di non conformità del prodotto finito.

L'anidride carbonica che si forma durante la fase di tostatura viene rilasciata, insieme ad altri gas e aromi, in un periodo di diversi giorni. Solitamente le quantità stimate di gas rilasciate sono pari a 6-10 litri per Kg di caffè tostato.

In fase di macinatura circa il 45% di anidride carbonica viene generalmente liberata dal prodotto.

È essenziale lo studio della cinetica di rilascio di anidride carbonica durante il degassaggio e dell'influenza dei parametri che ne favoriscono il controllo. Una fase di degassaggio svolta in maniera non appropriata può portare a diversi problemi in termini di confezionamento e di estrazione.

L'azienda Luigi Lavazza S.p.A. richiede la progettazione di un piano sperimentale che sia in grado di valutare l'influenza della variazione di diversi fattori sul processo di degassaggio.

Tramite strumentazione dedicata è possibile fare delle valutazioni sulla cinetica dei gas liberati dal prodotto in funzione delle diverse variabili in modo da avere una più comprensibile caratterizzazione del processo.

Durante la progettazione del piano si è resa opportuna, per analoghi motivi presentati per il primo piano sperimentale, la scelta di un piano fattoriale per il quale valgono le analoghe ipotesi di lavoro descritte precedentemente.

4.4.2. Fattori e livelli

Miscela

Tra gli obiettivi del piano sperimentale vi è quello di analizzare l'effetto della miscela sulla cinetica dei gas rilasciati dal caffè tostato e macinato e comprendere quello che può essere l'effetto della varietà robusta sul processo.

Anche in questo caso sono state prese in considerazione le tre varietà di caffè principali:

- Arabica naturale;
- Arabica lavata;
- Robusta.

I livelli del fattore sono definiti da tre miscele, ciascuna costituita da due varietà diverse presenti con proporzioni differenti:

- Miscela 1;
- Miscela 2;
- Miscela 3.

Crivello

Delle valutazioni sono rese necessarie relativamente alla dimensione del caffè verde.

La maggiore o minore superficie di contatto può essere determinante sul rilascio di anidride carbonica e gas da parte del caffè tostato.

Per classificare i chicchi di caffè in base alla loro dimensione viene utilizzato, come unità di misura, il crivello, il quale rappresenta un 64esimo di pollice.

In tal caso sono state scelte due dimensioni differenti dei chicchi di caffè crudo:

- Crivello piccolo (13 – 15);
- Crivello grande (16 – 18).

Ciclo di tostatura

All'interno del piano sperimentale relativo al processo di degassaggio è prevista una valutazione sull'influenza di diversi profili di tostatura.

A differenza del piano sperimentale precedentemente descritto viene studiato l'effetto dovuto a quattro profili di tostatura e tostatrici differenti.

In tale studio vengono utilizzate delle tostatrici di laboratorio con carico che va da circa 300 grammi per la tostatrice ad aria fino a 500 grammi per la tostatura a tamburo.

Si nota come i cicli di tostatura, in questo caso, siano differenti non soltanto per il tempo di tostatura effettivo, ma anche per la diversa modalità di esecuzione del processo: oltre a tostature ad aria effettuate per convezione, sono realizzate anche delle tostature a conduzione tramite l'utilizzo di tostatrice a tamburo.

I livelli del fattore ciclo di tostatura sono così definiti:

- Ciclo a convezione 1;
- Ciclo a convezione 2;
- Ciclo a conduzione 1;
- Ciclo a conduzione 2.

I quali indicano rispettivamente una tostatura con trasferimento di calore per convezione molto rapida, una tostatura ad aria con durata maggiore e due tostature a tamburo, con trasferimento di calore per conduzione tramite contatto del caffè con le pareti della tostatrice.

Colore

Diversi studi, citati nei precedenti capitoli, confermano come un grado di tostatura più elevato conferisce al caffè in grani un maggiore contenuto di anidride carbonica al loro interno rispetto ad un caffè con un grado di tostatura inferiore.

I due livelli del fattore colore fanno riferimento a due estremi i quali indicano una tostatura molto chiara e una tostatura relativamente scura:

- Chiaro;
- Scuro.

Entrambi i livelli, vengono misurati, al termine del processo di tostatura tramite colorimetro.

Polveri

È inoltre dimostrato come la percentuale di anidride carbonica intrappolata nel caffè è minore tanto più piccola è la dimensione delle particelle. Con la macinatura vengono infatti distrutte le cavità contenenti i vari gas formati durante il processo di tostatura.

In termini di macinazione sono fatte delle valutazioni che riguardano la percentuale di polveri senza considerare il X50 come fattore del piano sperimentale.

Durante l'esecuzione del piano verrà utilizzato, per la macinatura, un semplice strumento da bar e non, come nel piano precedente, un macchinario più complesso a due stadi. Oltre a dipendere strettamente dalla percentuale di polveri, per il X50 risulta complicato, in tal modo, centrare un preciso valore puntuale prestabilito.

I due valori di percentuale di polveri scelti per il piano sono:

- Polveri basse;
- Polveri alte.

FATTORE	LIVELLI
1. Miscela	1.1. Miscela 1
	1.2. Miscela 2
	1.3. Miscela 3
2. Crivelli	2.1. Piccolo (13 – 15)
	2.2. Grande (16 – 18)
3. Ciclo di tostatura	3.1. Ciclo a convezione 1
	3.2. Ciclo a convezione 2
	3.3. Ciclo a conduzione 1
	3.4. Ciclo a conduzione 2
4. Colore	4.1. Chiaro
	4.2. Scuro
5. Polveri	5.1. Polveri basse
	5.2. Polveri alte

Tabella 4 - Schema riassuntivo fattori e livelli DoE Degassaggio.

4.4.3. Variabili di risposta

Tramite strumentazione dedicata gli effetti sul processo di degassaggio vengono misurati in termini di variazione di pressione, di percentuale di anidride carbonica e di volume di gas liberato.

Una volta inserito il caffè tostato e successivamente macinato secondo i livelli stabiliti per ciascuno dei fattori, all'interno di particolari bussolotti di vetro e, quindi, a volume costante è possibile, tramite sensori di rilevazione di pressione, avere una stima della variazione della pressione stessa nel tempo. Da tali valori è possibile risalire al volume di gas che viene rilasciato nel tempo dal campione di caffè considerato.

Inoltre, può essere monitorata la percentuale di anidride carbonica presente all'interno dello spazio di testa per discriminare tale gas dal resto dei composti volatili e dagli aromi.

La misura di queste variabili risulta fondamentale nella caratterizzazione del processo in quanto permettono di avere una chiara visione del degassaggio all'interno delle capsule e consentono di ridurre, con uno studio più approfondito, il numero di prodotti non conformi. La percentuale di CO₂ presente nei gas liberati dal prodotto consente, inoltre, di avere una stima dei composti aromatici e di altri composti volatili presenti nello spazio di testa.

VARIABILE DI RISPOSTA	Unità di misura
Pressione	Bar
Percentuale CO₂ liberata	Percentuale
Volume di gas liberato	Nml

Tabella 5 - Schema riassuntivo variabili di risposta DoE Degassaggio.

4.4.4. Metodi e strumenti

Setaccio

Nella definizione del piano sperimentale è inserito tra i fattori la dimensione dei chicchi di caffè crudo.

In alcuni casi, questi sono già differenziati per natura in quanto la dimensione dei chicchi viene utilizzata anche come sistema di classificazione commerciale, in altri è necessario intervenire tramite crivellatura per discriminare, all'interno di un lotto, i prodotti con dimensioni maggiori da quelli più piccoli.

La crivellatura rappresenta la selezione dei chicchi di caffè effettuata tramite setacci costituiti da lastre con fori calibrati il cui diametro, indicato in 64esimi di pollice, indica un crivello.

Tostatrice ad aria

Nella tostatrice ad aria, presente in laboratorio, utilizzata per il piano sperimentale sopra descritto, la camera di tostatura è dotata di un dispositivo di miscelazione rotante con spatole di agitazione.

I chicchi di caffè vengono riscaldati dal basso verso l'alto tramite aria calda che entra nella parte inferiore della camera di tostatura. A tostatura terminata i chicchi passano in una camera di raffreddamento ad aria, in quanto tale tostatrice non è dotata di strumentazione per raffreddamento ad acqua.

Il carico della tostatrice, essendo di piccola dimensione, può raggiungere i 300 grammi.



Figura 47 - Tostatrice ad aria da laboratorio.

Tostatrice a tamburo

Durante la tostatura tramite tostatrice a tamburo i chicchi di caffè sono mantenuti in movimento dalla rotazione del tamburo.

Solitamente la tostatrice a tamburo impiega più tempo rispetto alle tostatrici ad aria e, oltre che per via convettiva, la tostatura avviene anche per via conduttiva.

Così come per la tostatrice ad aria, essendo un macchinario di laboratorio di piccola taglia, con carico fino a 500 grammi, il raffreddamento avviene ad aria dove il caffè viene mosso da delle pale a temperatura ambiente.



Figura 48 - Tostatrice a tamburo da laboratorio.

Strumentazione per la valutazione del degassaggio

La strumentazione relativa alla determinazione del degassaggio in termini di quantità e comportamento nel tempo è sviluppata da Probat⁸. Essa consente di esaminare, oltre alla variazione di pressione causata dal degassaggio, l'influenza di gas protettivi inerti che sono solitamente utilizzati per il trasporto e lo stoccaggio come ad esempio l'azoto.

La pressione che si accumula, all'interno dei silos, durante lo stoccaggio è il principale fattore per la determinazione della quantità di gas rilasciata.

La strumentazione viene progettata con lo scopo di esaminare l'effetto del diverso grado di tostatura e del diverso tempo di processo, del grado di macinatura e di altri parametri caratterizzanti il prodotto sul comportamento del degassaggio.

Lo strumento è costituito da sei bussolotti di vetro e da una cabina di sensori integrata che consente il monitoraggio e la registrazione dei dati nel tempo tramite l'ausilio di un laptop e di un software dedicato.

La flessibilità dello strumento consente di inserire, facilmente, ulteriori sensori di rilevazione di gas quali anidride carbonica, azoto e ossigeno.

Ciascun bussolotto è dotato di una termocoppia per l'acquisizione della temperatura e della pressione i cui andamenti possono essere monitorati dal software connesso. All'interno di ciascun bussolotto viene inserita una quantità di caffè di 250 grammi ritenuta ottimale per lo studio del processo.

Il volume di gas è determinato da una formula calcolata automaticamente dal software che viene presentata direttamente come una curva di dati.

$$V \left[\frac{Nml}{500g} \right] = \left[\left((V_{bussolotti} - V_{riempito}) * \frac{(P_{esterna} + P_{interna})}{P_{norm}} * \frac{T_{norm}}{T_{norm} + T_{interna}} \right) - \left((V_{bussolotti} - V_{riempito}) * \frac{P_{interna\ iniziale}}{P_{norm}} * \frac{T_{norm}}{T_{norm} + T_{iniziale}} \right) \right] * \frac{500}{G_{riempimento}}$$

La formula restituisce il volume di gas liberato dal prodotto in mL normalizzati su 500 grammi di prodotto.

⁸ www.probat.com



Figura 49 - Strumentazione Probat per valutazione degassaggio caffè tostato e macinato.

4.4.5. Sviluppi futuri

La sperimentazione relativa al degassaggio di caffè tostato è in fase di definizione.

Le attività in corso riguardano:

- Validazione strumentazione tramite test in laboratorio;
- Pianificazione esperimenti e di programmazione delle prove.
- Definizione *gantt* di progetto e conseguente calendarizzazione delle prove.

Una volta studiato il piano e l'ammissibilità dello stesso verranno svolte delle prove preliminari utili anche a valutare i fattori considerati e i limiti entro i quali questi possono essere fatti variare.

L'esecuzione delle prove e conseguente analisi viene, quindi, rimandata a lavoro futuro.

5. Conclusioni

Il lavoro di ricerca nasce dall'esigenza dell'azienda Luigi Lavazza S.p.A. di progettare e in seguito condurre un piano sperimentale al fine di osservare o verificare l'effetto di alcuni fattori sulla qualità in tazza di caffè in capsule.

Lo studio si occupa, in una prima fase, di descrivere le fasi del processo produttivo di caffè e come queste possano influenzare la qualità finale del prodotto. In seguito, si entra nel merito della sperimentazione focalizzando l'attenzione sulle variabili su cui si intende indagare, sulla pianificazione e sull'esecuzione delle prove descrivendo, nel dettaglio, le modalità di gestione delle stesse oltre che i diversi strumenti utilizzati e le modalità operative.

Ricavati i dati di sperimentazione si passa allo studio e all'analisi degli effetti dei fattori sulle variabili di risposta utilizzando le più comuni metodologie statistiche.

L'analisi della varianza ha consentito di mettere in risalto i fattori e le interazioni di secondo ordine maggiormente significative.

Tramite l'utilizzo di algoritmi di regressione descritti nei relativi paragrafi è stato possibile quantificare l'effetto di ciascuna variabile di input e di ottenere, in tal modo, dei modelli di regressione utili soprattutto per analisi predittive.

La sperimentazione, oltre ad aver consentito di ottenere uno screening completo dei fattori considerati, ha confermato alcune ipotesi di partenza e messo in risalto la significatività di nuovi fattori quantificandone l'effetto. Viene reso noto, all'interno del lavoro, come l'azienda Luigi Lavazza S.p.A. sia incline a celare informazioni relative alla progettazione del piano, all'esecuzione dello stesso e, soprattutto, ai risultati ottenuti dall'esperimento.

Un ultimo capitolo è dedicato agli sviluppi futuri che riguardano la validazione del modello e l'applicazione, in stabilimento produttivo, di ciò che è stato appreso dalle prove in laboratorio.

Lo studio termina con la descrizione di un secondo piano sperimentale relativo a una specifica fase della catena produttiva, il degassaggio, che sarà implementato solamente dopo aver pianificato correttamente le prove e aver validato la strumentazione necessaria.

Oltre ai risultati ottenuti al termine delle prove che consentono all'azienda di avere una completa mappatura del processo e di prevedere, in molti casi, il comportamento del prodotto finito, ciò che non deve passare in secondo piano è l'apprendimento di una nuova

metodologia di sperimentazione. Di fondamentale importanza è risultata la fase pre-sperimentale in cui sono stati definiti gli obiettivi di progetto coinvolgendo diversi team di lavoro, validata la strumentazione e pianificato l'ordine delle prove e le modalità operative. Inoltre, la complessità del piano e l'elevato numero di prove hanno consentito al personale coinvolto di confrontarsi con le proprie capacità di coordinamento e di gestione di risorse.

Bibliografia

- Anacafé – Perfiles de tueste y sabor: dos elementos ligados del café. Disponible su: https://www.anacafe.org/glifos/index.php?title=Perfiles_de_tueste_y_sabor
- Baggenstoss, J. Poisson, L. Kaegi, R. Perren, R. e Escher, F. (2008). Coffee Roasting and Aroma Formation: Application of Different Time temperature Conditions. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 56(14), 5836-5846.
- Barbera, C. E. 1967. Gas-volumetric method for the determination of the internal non odorous atmosphere of coffee beans. *Association Scientifique Internationale du Cafe 3rd Symposium, Trieste*, pp.436-442.
- Berthaud J., Charrier A. (1988), Genetic resources of Coffea, in R.J Clarke, R. Macrae (a cura di), *Coffee: Volume 4 – Agronomy*, Londra, Elsevier Applied Science.
- Bridson D.M., Verdcourt B. (1988), Rubiaceae (Part 2), in R.M. Polhill (a cura di), *Flora of Tropical East Africa*, Rotterdam, Balkema.
- Cardelli-Freire, C. 1997. Kinetics of the shelf life of roasted and ground coffee as a function of oxygen concentration, water activity and temperature. Ph.D. Thesis, University of Minnesota, St. Paul, MN
- Clarke R.J. (1987b), Roasting and grinding, in R.J Clarke, R. Macrae *Coffee: Volume 2 – Technology*, Londra, Elsevier Applied Science.
- *Coffee Sapiens*, 2018.
- Coleman, D. E., and D.C. Montgomery (1993)., “A Systematic Approach to Plannig for a Designed Industrial Experiment” (with Discussion). *Technometrics*, Vol. 35, pp. 1-27.
- Domaschi A. (2012), Studio sulla Macinazione del Caffè in Apparecchiature per la Ristorazione. Tesi di Laurea Magistrale in Ingegneria Chimica e dei Processi Industriali dell’Università degli Studi di Padova: Dipartimento di Ingegneria Industriale. Disponibile su: http://tesi.cab.unipd.it/41843/1/Alberto_Domaschi_-_Studio_sulla_macinazione_del_caff%C3%A8_in_ap.pdf
- Douglas C. Montgomery, 2005. Progettazione e analisi degli esperimenti.
- Eggers, R. e Pietsch, A. (2001). *Coffee: Recent Developments*. Oxford: Blackwell Science Ltd.
- Felbinger R. (2016), Is It Always Better to Grind Fresh? Disponibile su PRIMA Coffee Equipment: <https://prima-coffee.com/learn/article/grinder-basics/is-it-always-better-grind-fresh>
- Fischer, C.,2005. Kaffee. Anderungphysikalisch-chemischer Parameter beim Rosten, Quenchen und Mahlen (Ph.D.thesis). TU Carolo Wilhelmina zu Braunschweig.
- Folmer, B. (2017). *The Craft And Science Of Coffee*.
- Grosch, W., 2001. Chemistry, volatile compounds. In: Clarke, R.J., Vitzthum, O.G. (Eds.), *Coffee. Recent Developments*. Blackwell Science Ltd., London (Chapter 3).
- Heiss, R., R. Radtke, and L. Robinson. 1977. Packaging and marketing of roasted coffee. *Association Scientifique Internationale du Cafe 8thSymposium, Abidjan*, pp.163-174.

- Hernandez, J. A. Heyd, B. Irlles, C. Valdovinos, B. e Trystram, G. (2007). Analysis of the heat and mass transfer during coffee batch roasting. *Journal of Food Engineering* 78(4), 1141-1148.
- Hodge, J. E. 1953. Dehydrated foods: chemistry of browning reactions in model systems. *J. Agr. Food Chem.* 1:928-943.
- Illy A., Viviani R., 1995. *Il caffè espresso, la scienza della qualità.*
- Illy, A. e Viani, R. (1998). *Espresso coffee.* San Diego: Academic press.
- Lingle, T. R., 2011. *The coffee brewing handbook, A systematic guide to coffee preparation.*
- Nagaraju, V. D. Murthy, C. T. Ramalakshmi, K. e Srinivasa Rao, P. N. (1997). Studies on roasting of coffee beans in a spouted bed. *Journal of Food Engineering* 31(2), 263-270.
- Olson, B. (2002). *Generalized Linear Model, An applied approach.*
- Petracco, M., Marega, G., 1991. Coffee grinding dynamics: a new approach by computer simulation. *Proceedings of the 14th ASIC Colloquium* 14, 319e330.
- Pittia P., Lerici C.R. (2001), Textural changes of coffee beans as affected by roasting conditions, in *Lebensmitt. Wiss. Technol.* 34, pp. 168-175.
- Poisson, L., Kerler, J., Davidek, T., Blank, I., 2014. Recent developments in coffee flavour formation using biomimetic in-bean experiments. In: *Proceedings of the 25th International Conference on Coffee Science. ASIC, Paris, France.*
- Radtke, R. 1973. Ueberblick ueber den heutigen stand der verpackungstechnik fuer roestkaffee unter besonderer beruecksichtigung der aromaerhaltung. *ASIC 6e Colloque, Bogota*, pp.188-198.
- Schenker, S. R. (2000). *Investigations On The Hot Air Roasting Of Coffee Beans.* Swiss Federal Institute Of Technology.
- Schenker, S., Handschin, S., Frey, B., Perren, R., Escher, F., 2000. Pore structure of coffee beans affected by roasting conditions. *Journal of Food Science* 65 (3).
- Schenker, S., Heinemann, C., Huber, M., Pompizzi, R., Perren, R., Escher, F., 2002. Impact of roasting conditions on the formation of aroma compounds in coffee beans. *Journal of Food Science* 67 (1).
- Shimoni E., Labuza T.P. (2000), degassing kinetics and sorption equilibrium of carbon dioxide in fresh roasted and ground coffee, in *J. Food Process Eng.* 23, pp. 419-436
- Wang N. (2012), *Physicochemical Changes of Coffee Beans During Roasting.* Thesis Presented to The University of Guelph. Disponibile su: <https://pdfs.semanticscholar.org/7b63/bc2fcdc2b126416e638ea98820c98529bb24.pdf>
- Wootton A.E. (1971), The dry matter loss from parchment coffee during filed processing, in *Proc. 5th ASIC Coll.*
- Yeretian, C. Jordan, A. Badoud, R. e Lindinger, W. (2002). From the green bean to the cup of coffee: investigating coffee roasting by on-line monitoring of volatiles. *European Food Research and Technology* 214(2), 92-104.

Ringraziamenti

Ringrazio tutte le persone che hanno contribuito al raggiungimento di questo traguardo: chi con collaborazione e supporto costante, chi con semplici consigli o suggerimenti.

Un grande ringraziamento va fatto, innanzitutto, alla mia famiglia e, in particolare, ai miei genitori per il loro continuo e instancabile sostegno, mi hanno permesso di arrivare fin qui e a loro va sicuramente riconosciuto il contributo più grande alla mia formazione personale.

Grazie a Natalia per essere sempre stata presente riuscendo, in qualunque circostanza, a spronarmi e incoraggiarmi.

Sento di ringraziare, in modo particolare, il prof. Galetto, per la conoscenza che mi ha donato, per la fiducia, la disponibilità e la precisione dimostratemi durante il periodo di lavoro e di stesura.

Ringrazio Gianfranco e Elisa per il supporto, i consigli e tutto ciò che sono riusciti a trasmettermi.

Grazie agli amici di sempre per aver condiviso con me tutte le esperienze più importanti, le gioie e i successi e per avermi sempre sostenuto sia da vicino che a distanza.

Grazie agli amici “torinesi” che hanno avuto un peso determinante nel conseguimento di questo risultato, soprattutto a Nicola per il continuo sostegno e incoraggiamento.

Infine, vorrei ringraziare i colleghi Lavazza per la cordialità e il calore con cui mi hanno accolto in azienda e per aver reso la mia prima esperienza lavorativa serena e piacevole. Ringrazio in modo particolare Raffa e Luca per la collaborazione, la disponibilità e i continui insegnamenti. Siete riusciti a farmi sentire sempre fiero e orgoglioso di questo progetto. Grazie ai miei nuovi “compagni di banco”, a Silvia per essere sempre riuscita a trovare tempo per consigli e suggerimenti e, a Enzo, Paolo e Federico per l’amicizia dimostrata in questi mesi.

Grazie a chi non può essere qui con me, ma che spero che da Lassù possa essere orgoglioso del mio traguardo.