



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

DIPARTIMENTO DI PRINCIPI E IMPIANTI DI INGEGNERIA CHIMICA “I. SORGATO”

TESI DI LAUREA IN INGEGNERIA CHIMICA

CLASSE 10 INGEGNERIA INDUSTRIALE

(DM 509/99)

**VERIFICA SPERIMENTALE DI MODELLI DI TRASPORTO
DI ACQUA NELL'ESSICCAZIONE DI PASTA LUNGA**

Relatore: Prof. Massimo Barolo

Correlatore: Dott. Luciano Mondardini

Laureando: GIACOMO PADOVAN

ANNO ACCADEMICO 2010 – 2011

Riassunto

La Tesi è uno studio condotto durante l'attività di tirocinio presso l'azienda Pavan S.p.A. di Galliera Veneta, specializzata nella realizzazione di impianti e macchine per la produzione di pasta alimentare. Oggetto dello studio sono la valutazione degli effetti dell'inversione di flussi d'aria su 'pasta alimentare lunga', durante la fase di pre-essiccazione ed essiccazione, e la verifica sperimentale di modelli sul trasporto d'acqua nella pasta.

Lo studio si realizza in due fasi: la prima riguarda la determinazione delle temperature dell'aria e della pasta durante l'essiccamento, la seconda riguarda la determinazione dell'umidità nel tempo in diversi punti della pasta, durante i diversi cicli di essiccazione.

I risultati emersi dallo studio evidenziando l'incidenza dei flussi sulla velocità di essiccazione e delineano potenziali innovazioni e prospettive future di applicazione, nell'ambito di grandi produzioni industriali. L'affinamento del modello, la verifica con un sistema continuo preliminare in un impianto di piccole dimensioni e successivamente applicato su scala industriale, costituiscono allo stato attuale nuovi campi di ricerca con potenziali applicazioni nel settore della produzione di paste alimentari e affini.

Indice

INTRODUZIONE	1
CAPITOLO 1 – Il processo di essiccazione	3
1.1 STORIA DELL'ESSICCAZIONE.....	3
1.2 IL MODELLO FISICO.....	5
1.2.1 Trasferimento del calore.....	6
1.2.2 Il modello di De Cindio.....	7
1.2.3 La reazione di Maillard.....	9
1.2.4 Ventilazione e rinvenimento.....	10
1.3 IL MODELLO MATEMATICO.....	11
1.4 FUNZIONAMENTO DI UN ESSICCATOIO.....	13
1.4.1 Pre-essiccazione.....	13
1.4.2 L'essiccazione.....	14
1.5 OBIETTIVI DELLA TESI.....	16
CAPITOLO 2 – Metodo di ricerca	19
2.1 LA PRODUZIONE DEGLI SPAGHETTI.....	19
2.1.1 La procedura di produzione sull'impianto pilota.....	20
2.2 LA PRODUZIONE DELLE TAGLIATELLE.....	21
2.3 L'ESSICCAMENTO DELLA PASTA LUNGA.....	22
2.4 ANALISI DI TEMPERATURA E UMIDITÀ.....	24
2.5 ANALISI ORGANOLETTICHE.....	26
2.6 LE DUE FASI DELLA RICERCA.....	26
2.6.1 Confronto tra i profili di temperatura dell'aria e della pasta.....	27
2.6.2 I profili di umidità.....	28
CAPITOLO 3 – Risultati e discussione	31
3.1 I FASE – PROFILI DI TEMPERATURA E UMIDITÀ FINALE.....	31
3.1.1 Confronto fra le temperatura nel singolo flusso e nel doppio flusso.....	31
3.1.2 Analisi al microscopio – Risultati.....	34
3.1.3 Umidità finale.....	37
3.2 II FASE – PROFILI DI UMIDITÀ.....	38
3.3 ANALISI MATEMATICA DEI DATI.....	42
CONCLUSIONI	47
RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	49
RINGRAZIAMENTI	51

Introduzione

“...sopra la quale stava gente che niun'altra cosa faceva che fare maccheroni e raviuoli, e cuocerli nel brodo di capponi.” Veniva così descritta la produzione artigianale di pasta dal Boccaccio nel Decamerone.

Dalla seconda metà del secolo scorso una progressiva diffusione dei consumi e della produzione di pasta, in tutta la penisola, ha dato impulso a sistemi di produzione industriale avanzati. L'automazione dei processi produttivi, la maggiore conoscenza della chimica degli alimenti, della conservazione e del packaging, lo sviluppo delle strategie di marketing, hanno consentito alle industrie alimentari notevoli sviluppi, producendo su scala industriale prodotti che, fino a poco tempo fa, erano limitati alla produzione domestica e a quella artigianale.

A tutt'oggi l'industria della pasta alimentare è considerata uno dei settori di punta del *made in Italy* con un mercato internazionale in continua espansione. La filiera produttiva comprende le seguenti fasi: impasto delle materie prime, trafilatura, essiccazione, confezionamento. Tradizionalmente si usa dividere la pasta tra pasta corta (fusilli, cornetti, pipe, penne), pasta lunga (spaghetti, linguine), pasta a nido e paste speciali (matasse, lasagne). Le diverse produzioni si differenziano evidentemente per la fase di trafilatura o formatura ma soprattutto per le tipologie dei sistemi di essiccazione che devono essere impiegati per ciascuna al fine di conservare la forma corretta per un tempo di processo che può essere anche di diverse ore. L'essiccazione poi è considerata una delle fasi determinanti, per ottenere un prodotto conforme alle caratteristiche prestabilite, una fase peculiare dove le variabili legate alla condizione dell'aria di essiccazione devono costantemente essere monitorate.

Il lavoro presentato in questa Tesi è stato svolto presso il centro R&S della Pavan s.r.l. di Galliera Veneta (PD). L'azienda Pavan, fondata nel 1946, è una delle aziende leader nella fornitura di impianti per la produzione di pasta secca e storicamente si è distinta per il livello di innovazione dei suoi impianti. È stata pioniera della tecnologia dell'impastamento ed estrusione sotto vuoto e nello sviluppo di una linea continua di essiccazione ad altissima temperatura. L'azienda di Galliera Veneta esporta per il 95% in 118 paesi, impiega 450 dipendenti con filiali commerciali in tutto il mondo. L'attività di ricerca e sviluppo (R&S), è svolta da un gruppo di lavoro multidisciplinare, altamente specializzato e costantemente aggiornato per lo sviluppo di prodotti e di processi. Il settore dispone di un laboratorio attrezzato per analisi chimiche, chimico-fisiche, reologiche, nutrizionali e organolettiche. Il lavoro nel settore R&S si sviluppa in un'ottica di:

- ricerca di processi innovativi e/o alternativi, di nuovi materiali, di nuove metodologie analitiche e nei settori della pasta secca, fresca, degli snacks, cereali da colazione e cereali in polvere per l'infanzia

- partecipazione in partnership a progetti di ricerca italiani ed europei;
- organizzazione e gestione dei corsi della Scuola di Tecnologie Alimentari Pavan;
- rapporti con il mondo accademico nazionale ed internazionale.

Lo scopo dello studio è sviluppare un'analisi del processo di essiccazione della pasta lunga, con l'applicazione e la verifica pratica di modelli di trasporto di acqua. Nello specifico si è voluto verificare gli effetti dei flussi d'aria, con cambi periodici di direzione. La tradizionale linea di essiccazione per la pasta lunga stesa su canne, prevede che l'aria calda e secca investa la pasta solo dall'alto. Lo studio si è proposto di invertire il flusso d'aria, facendolo andare alternativamente dall'alto e dal basso, valutando temperatura e umidità dell'ambiente e della pasta. La produzione della pasta (tagliatelle e spaghetti), l'essiccazione della stessa e le analisi al microscopio sono stati realizzati rispettivamente negli impianti pilota aziendali e nel laboratorio attrezzato dell'area di R&S.

La Tesi è composta da tre Capitoli che delineano la storia dell'essiccazione e i modelli fisici e matematici che la descrivono, la strumentazione e la metodica con cui sono state svolte le varie prove, l'analisi dei risultati ottenuti.

Capitolo 1

Scopo dello studio

Il Capitolo riporta alcune note storiche sull'essiccamento della pasta e descrive i principi fisici e le equazioni matematiche dell'essiccamento. Inoltre tratta il funzionamento generale dei moderni essiccatoi per pasta lunga ed i principi che lo governano. Sono descritte le procedure per diminuire i tempi di essiccamento sfruttando una diversa configurazione dei flussi d'aria ed i conseguenti vantaggi ottenuti a livello industriale.

1.1 Storia dell'essiccazione

La conservazione degli alimenti, la primaria necessità di preservare nel tempo l'edibilità e il valore nutritivo di un prodotto alimentare, hanno rappresentato nella storia dell'uomo un fattore di sviluppo di enorme importanza per ragioni economiche, geografiche, politiche, demografiche. I cereali, componente principale dell'alimentazione nelle diverse popolazioni, rappresentano un fattore economico significativo in tutti i Paesi.

Per molti secoli e fino a pochi decenni or sono, si disidratavano gli alimenti per poterne disporre per l'inverno o per i viaggi via mare, usando il sole nelle regioni più calde e soleggiate, oppure il forno a legna che, dopo la cottura del pane, veniva utilizzato per l'essiccazione. Una volta spento il fuoco e terminata la combustione delle braci, all'interno del forno, nel corso del suo lento raffreddamento, si manteneva una temperatura non elevata ma abbastanza costante da permettere l'essiccazione di molti alimenti come carne, frutta, verdura, sementi ed altro.

L'essiccazione della pasta alimentare sembra diffondersi attorno al 1100 d.C. con le peregrinazioni arabe (Cabras e Martelli, 2004). Tale processo offre importanti vantaggi, consentendo di ottenere un prodotto alimentare più compatto rispetto ai cereali in grano, un rischio inferiore di deperimento e, soprattutto, tempi più lunghi di conservazione rispetto alle paste fresche.

In Italia le regioni Sicilia e Liguria hanno dato origine ed impulso alla diffusione della pasta secca in tutta la penisola. Isolani i Siciliani, rivieraschi i Liguri, entrambi con la necessità di muoversi per mare, avevano la necessità di disporre di provviste meno deperibili rispetto a pane e pasta fresca, e meno voluminose. La disponibilità di pasta a lunga conservazione (Morelli, 1991) risolveva il problema di avere, a bordo delle navi, provviste ad elevato apporto energetico.

Il processo di essiccazione, in queste regioni, è stato favorito da un clima particolare. Venezia, terra anch'essa di grandi navigatori, ignorava la pasta secca: il clima lagunare, molto più umido e freddo, non consentiva un'efficace essiccazione della pasta al sole ed all'aria.

La città di Napoli è ritenuta luogo privilegiato dove avviene, già dal 1600, e si diffonde la caratterizzazione della pasta come prodotto tipico della cultura italiana, *fino a diventare ai giorni nostri* – come sostiene Oretta Zanini De Vita (2010)- *parte della civiltà italiana, simbolo di un sistema di vita alimentare che parla soprattutto di filosofia del vivere, logo e bandiera dell'Italia nel mondo* (figura 1.1b).



Figura 1.1 (a) Spaghetti stesi ad asciugare nei pressi di Napoli, fine Ottocento; (b) Sordi nel film “Un americano a Roma”

A Napoli ‘o *spannatore*’ aveva il compito di stendere la pasta nelle canne e metterle immediatamente al sole o all’aria aperta. La pasta fresca infatti è igroscopica e sensibile al clima, per questo i pastai dell’epoca scrutavano il cielo e sentivano i venti per decidere quando mettere la pasta ad essiccare. “*I maccheroni si fanno con lo scirocco e si asciugano con la tramontana*” è un detto napoletano ad indicare come il vento tiepido e umido del sud sia necessario all’inizio dell’essiccazione e quello secco e freddo del nord per i giorni seguenti. Gli abili pastai sapevano che, tra aprile ed ottobre, lo scirocco cambiava in tramontana tra l’una e le due di notte ed era necessario trasportare la pasta alle zone di essiccazione all’aria aperta. Le vecchie strade di Torre Annunziata e Gragnano, trasformate in grandi essiccatoi all’aria aperta (Figura 1.1a), echeggiavano delle urla degli ‘*u chiamatori*’ che svegliavano i pastai al cambiare del vento. L’essiccazione richiedeva otto giorni in estate, in inverno invece più di tre settimane (Zanini De Vita, 2009).

Nel nord Italia, per sopperire ad un clima poco adatto, venne inventata la *giostra*: un cilindro di legno, formato da un asse centrale che sosteneva le canne per la pasta lunga o i telai per pasta corta. La giostra si trovava in un locale riscaldato e girava per azione animale o idrica (Lirici, 1999).

Nel XIX secolo sono state introdotte le celle statiche: dei cassoni chiusi in legno o stanze intiere riscaldate, in cui la pasta veniva riposta tramite dei carrelli

Nei primi anni '50 furono installati i primi essiccatoi continui, in concomitanza con un nuovo e crescente benessere, che cambiò le abitudini italiane, inducendo maggiori consumi alimentari e di conseguenza la necessità di maggiori produzioni comprese quelle di pasta. In quegli anni per la pasta corta il processo di essiccazione continua si sviluppava entro le 8 e le 12 ore, per la pasta lunga entro circa 24 ore. Oggi i tempi di essiccamento si sono ridotti, tuttavia il principio di controllare umidità, temperatura e ventilazione rimane inalterato perché, come affermavano i vecchi pastai, *“la pasta deve essiccarsi con la sua propria aria”*.

1.2 Il modello fisico

Per essiccazione della pasta si intende il processo di progressiva disidratazione del prodotto umido, formato per estrusione, laminazione o altro sistema misto, da un valore iniziale di umidità ad un valore finale (12.5%) mediante il quale è assicurata la stabilità nel tempo del prodotto in condizioni di conservazione e stoccaggio (Mondelli, 2008). Per umidità della pasta si intende il rapporto tra la quantità d'acqua contenuta nella pasta ed il peso della sostanza umida, espresso in percentuale.

L'essiccamento richiede fondamentalmente diverse fasi, che avvengono simultaneamente (Figura 1.2):

- l'acqua allo stato liquido diffonde all'interno della pasta fino a raggiungere la superficie;
- l'evaporazione dell'acqua, che avviene all'interfaccia impasto/aria;
- l'acqua evaporata è trasportata e rimossa per moto convettivo nel seno della fase fluida del vettore di scambio. (De Cindio, Migliori, Carbone)

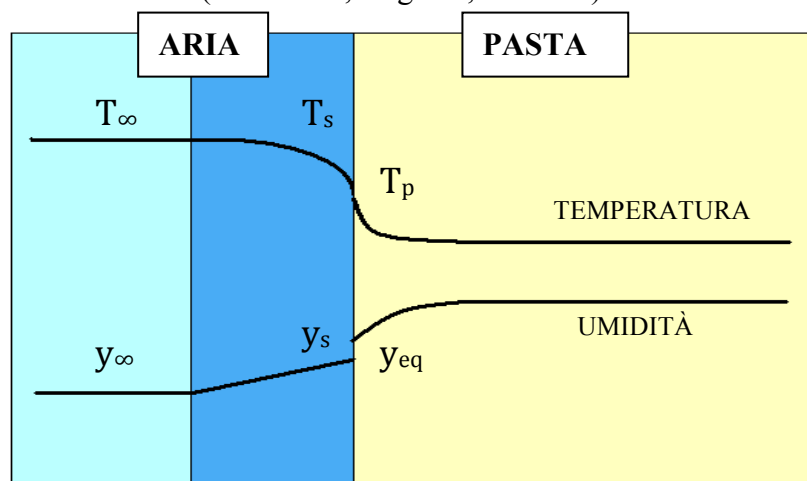


Figura 1.2 Profili di umidità e temperatura nell'aria e nella pasta in fase di essiccazione

L'aria utilizzata per l'essiccazione è pertanto una miscela complessa, sottoposta a continue modifiche di stato in base a temperatura ed umidità, secondo le leggi della termodinamica. L'acqua che deve essere rimossa è solo in parte libera, in parte è legata chimicamente agli

altri componenti della pasta. L'energia necessaria a vincere la resistenza dell'acqua legata chimicamente e necessaria alla sua diffusione verso la superficie e poi nell'aria è fornita dal calore.

1.2.1 Trasferimento del calore

È noto che l'aria secca è cattiva conduttrice di calore. Ne consegue che per trasferire calore alla pasta l'aria deve essere sufficientemente umida, invece per aumentare la velocità di evaporazione dell'acqua, dalla pasta all'aria, deve essere sufficientemente secca (Mondelli, 2003).

Si rivela necessario mantenere determinati valori di equilibrio igrotermico all'interno degli essiccatoi. L'intensità e la durata delle fasi di ventilazione, alternate a periodi di riposo in cui non vi è ventilazione, assicurano la migrazione delle molecole d'acqua dal centro della pasta verso la superficie (*rinvenimento*).

Il trasferimento di calore, oltre che dall'umidità, dipende anche dalla velocità stessa del flusso di aria essiccante. Questi due parametri sono espressi nel coefficiente K che compare nella formula per calcolare la portata di calore Q trasferita alla pasta:

$$Q = K \times S \times (T_A - T_P); \quad (1.1)$$

dove:

K = coefficiente globale di scambio termico aria/pasta;

S = superficie di scambio aria/pasta;

T_A = temperatura aria;

T_P = temperatura pasta.

Tale relazione risulta rilevante nella prima fase del processo, in cui l'evaporazione è predominante sulla diffusione, ad indicare che la velocità dell'aria è certamente importante nelle fasi iniziali, quando l'evaporazione superficiale riguarda l'acqua libera (fino circa al 23% di umidità nella pasta). Il calore tuttavia non interessa solamente la superficie, ma anche gli strati interni del prodotto. La sua diffusione per conduzione all'interno della pasta è descritta dalla seguente relazione:

$$Q = k_c * \frac{S \times \Delta T}{\delta}; \quad (1.2)$$

dove:

k_c = conducibilità termica della pasta;

δ = spessore pasta;

S = superficie di scambio aria/pasta;

ΔT = differenza di temperatura tra la superficie della pasta e degli strati interni.

1.2.2 Il modello De Cindio

De Cindio (1994) ha proposto con un approccio modellistico al processo di essiccazione, identificando i tre fenomeni che ne condizionano l'efficienza:

- trasporto dell'acqua e dell'energia all'interno della pasta (identificata dal coefficiente di diffusività di materia e dalla conducibilità termica);
- evaporazione dell'acqua dalla superficie di interfaccia aria/prodotto (caratterizzata da un'isoterma di assorbimento e dal calore latente di vaporizzazione);
- trasporto del vapore in fase gassosa (coefficienti di scambio di materia ed energia nel mezzo essiccante).

In Figura 1.3 è riportato l'andamento dell'umidità media nel tempo nel caso dell'essiccamento di un impasto di farina ed acqua, a *condizioni stazionarie imposte* del mezzo essiccante (De Cindio, 1994):

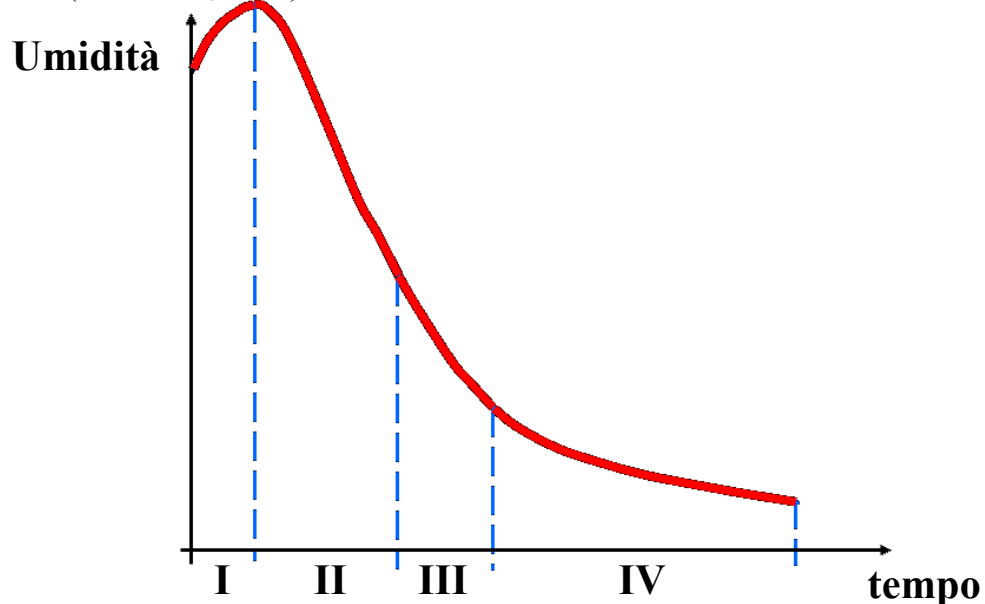


Figura 1.3 Andamento dell'umidità media nel tempo durante un essiccamento con condizioni stazionarie

Si possono individuare quattro zone che corrispondono a quattro fenomeni predominanti:

- Tratto I: in questo periodo la temperatura del solido varia fino ad uno stato stazionario. Prima di raggiungere lo stato di stabilità, la velocità di essiccazione può aumentare o diminuire, in base alle condizioni iniziali dell'impasto. Se si suppone che il solido sia ad una temperatura inferiore alla temperatura di rugiada, il vapore d'acqua contenuto nell'aria essiccante condenserà nella superficie cedendo al solido il calore latente di vaporizzazione che si sommerà a quello dato dalla differenza di temperatura con il mezzo essiccante. La temperatura del solido tende così ad aumentare fino a raggiungere una temperatura di equilibrio, in cui l'acqua tende ad evaporare dalla superficie. In queste condizioni il calore latente di vaporizzazione tenderà a raffreddare il solido; esso sarà però bilanciato dal flusso termico per convezione del

gas essiccante. Questa è nota come “temperatura di bulbo umido”, perché questa situazione è assimilabile a quella che avviene in un termometro a bulbo umido, per cui si usa equiparare la temperatura di superficie della pasta a quella del bulbo umido a quelle condizioni di temperatura ed umidità relativa.

- Tratto II: al transitorio sopra descritto segue uno stato stazionario di essiccazione, durante la quale la velocità di essiccazione rimane costante. Ciò è dovuto al fatto che la superficie rimane sempre satura, in quanto la diffusione interna di acqua è rapida e sono considerate nulle le resistenze al trasporto interno, che viene controllato perciò dal trasporto nella fase gassosa.
- Tratto III: quando il tenore di acqua si abbassa, appaiono gradienti interni di concentrazione ed il flusso d’acqua dal centro del pezzo alla superficie diminuisce. La temperatura però aumenterà alla superficie e ciò comporta un teorico aumento dell’evaporazione. Si assiste perciò a due fenomeni contrastanti, la resistenza di trasporto interno dell’acqua e l’aumento del trasporto in fase gassosa. In questa fase prevale il secondo fenomeno e l’evaporazione procede, seppur con velocità ridotte. Al contempo però, diminuendo la diffusione dell’acqua, si forma man mano una crosta di pasta secca all’esterno, in quanto la disponibilità d’acqua in superficie non è pari alle fasi precedenti.

Da notare che questa situazione tecnologica riguarda il 90% circa di un normale processo di essiccazione della pasta.

- Tratto IV: in questa fase è il primo fenomeno descritto sopra a prevalere. Questa situazione fisica corrisponde ad avere una superficie che non riesce più a perdere acqua, cioè praticamente secca. Ciò non sta a significare che non si ha più il fenomeno dell’evaporazione, ma che essa avverrà solo negli strati più interni, e la sua velocità diminuirà di molto in virtù della crosta esterna, che fa spostare sempre più verso il centro il fronte di evaporazione.

La situazione fisica descritta, dal punto di vista macroscopico ha un’interpretazione in termini di tipo di acqua da asportare. L’acqua presente nell’impasto si presenta in tre forme: acqua libera, parzialmente legata e fortemente legata. Ognuna di queste forme partecipa al trasporto nelle diverse fasi del processo.

Si deve tener presente che l’eliminazione dell’acqua comporta un cambiamento della struttura dell’impasto dovuto ad una diminuzione di volume; questo fenomeno è spesso denominato *shrinkage*. L’attività dell’acqua a_w , che si lega al contenuto di acqua nell’impasto, è un parametro importante nel processo di essiccazione; la si definisce come il rapporto tra la tensione di vapore dell’acqua contenuta nella pasta (p_w) e la tensione di vapore dell’acqua pura (p_w°), a temperatura costante.

$$a_w = p_w / p_w^{\circ} \quad (1.3)$$

Una fase critica per la definizione di essiccamento è quella relativa ad $a_w=0,7-0,9$ (tra 14% e 23%) che corrisponde all'asportazione dell'acqua capillare (Figura 1.4) (Di Leo, 1994).

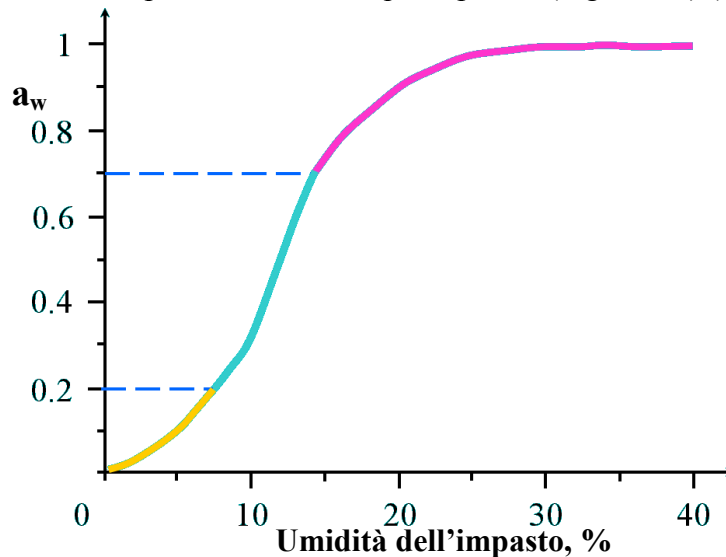


Figura 1.4 Andamento caratteristico dell'attività dell'acqua in funzione del contenuto di acqua nell'impasto

Quest'acqua è quella adsorbita sulla superficie delle particelle solide. Si tratta fondamentalmente di acqua legata, in quanto trattenuta per effetto della tensione superficiale. Il modo in cui l'asportazione di quest'acqua viene realizzata può modificare radicalmente la struttura fisica del sistema attraverso una redistribuzione della componente glucidica, tale da ottenere un prodotto di qualità scadente. Le paste potranno presentare cedimenti meccanici quali venature, bolle, ed altre imperfezioni indice di non conformità. Il tempo di conduzione di questa fase di processo, dovrà rispettare rigorosamente i parametri previsti, né essere condotta troppo rapidamente né troppo lentamente.

1.2.3 La reazione di Maillard

Il processo di essiccamento deve considerare il fenomeno dell'imbrunimento, una colorazione giallo scuro o sfumature tendenti al bruno della pasta, descritte nella reazione di Maillard. Essa consiste in un complesso di centinaia di possibili reazioni, generalmente caratterizzate da condensazione di amminoacidi o peptidi con la componente glucidica presente (Didonè e Pollini, 1992).

I migliori risultati si ottengono approssimandosi il più possibile al punto, in cui gli effetti della reazione di Maillard diventano palesi, sotto forma di alterazione del colore e del sapore, a questo limite vengono interrotte rapidamente le condizioni termoigrometriche che sovrintendono al fenomeno. L'attivazione di questa reazione dipende da interazioni delle variabili tempo, temperatura, pH, umidità dell'aria e del prodotto; questo è il motivo per cui

un impianto di produzione sarà tanto più efficiente quanto più flessibile ed adattabile a tali variabili.

Quest'effetto risulta tanto più evidente quanto più:

- è lungo il tempo di trattamento;
- è elevata la temperatura di essiccazione;
- è bassa l'umidità relativa dell'aria.

Risulta evidente che se un impianto non è stato adeguatamente progettato dal punto di vista termodinamico, si inneschi la reazione di Maillard, in maniera anche spinta, tate da rendere qualitativamente scadente e sgradevole all'aspetto la pasta essiccata.

1.2.4 Ventilazione e rinvenimento

Da quanto scritto si evince che l'essiccazione deve essere modulata sulle caratteristiche chimiche della pasta, dato che le molecole d'acqua devono diffondere verso la superficie vincendo la resistenza opposta dalle altre molecole costituenti il prodotto. Al diminuire progressivo della quantità d'acqua, né consegue un aumento della resistenza. Quando la quantità d'acqua, che diffonde dal centro alla superficie, è minore della quantità d'acqua che evapora, la ventilazione è inutile o addirittura controproducente se vi è la comparsa della 'crosta', descritta al paragrafo 1.2.2, essendo la velocità di evaporazione ulteriormente diminuita. Analogamente è necessario rimuovere l'eccesso di vapore presente all'interno dell'evaporatore, per evitare che l'evaporazione sia troppo rallentata. Tuttavia una determinata umidità dell'aria permette un maggiore trasferimento di energia termica all'interno della pasta e di conseguenza una più veloce diffusione.

Su queste considerazioni si basano le due principali fasi di essiccazione della pasta: *ventilazione* e *rinvenimento* (Figura 1.5).

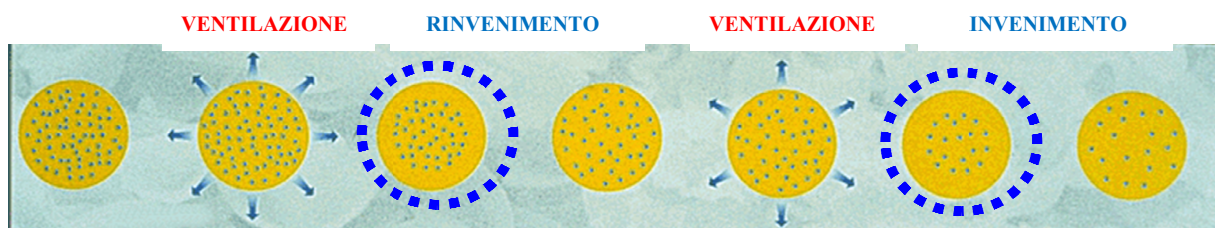


Figura 1.5 Rappresentazione di cosa avviene all'acqua nella sezione di uno spaghetti nelle fasi di ventilazione e rinvenimento

Con la prima si cede calore al prodotto e contemporaneamente si asporta il vapore che passa per trasporto dalla pasta all'aria nelle immediate vicinanze della sua superficie. In questo caso la velocità di evaporazione risulta elevata. Con la seconda si impone una pausa all'evaporazione, mantenendo elevata l'umidità si cede maggiore energia termica per

convezione naturale, aumentando la diffusione dell'acqua dal centro alla superficie (Mondelli, 2008).

La tecnologia TAS (*thermo active system*), elaborata dalla Pavan, prevede la fase di *rinvenimento attivo*, al posto del classico riposo della pasta in ambiente adeguato. Con questa tecnologia si forza aria stabilizzante sul prodotto, per accelerarne la stabilizzazione. Ciò si fa grazie all'aria essiccante di ritorno, che investe il prodotto da sotto a sopra, come evidenziato dalle frecce rosse e blu in Figura 1.6.

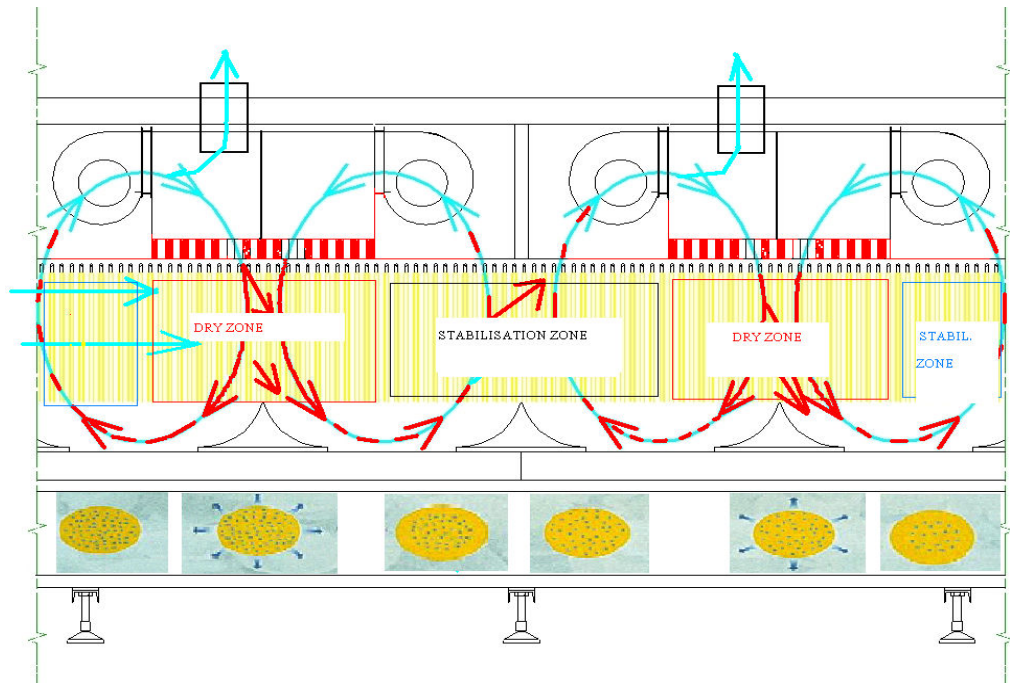


Figura 1.6 Fasi di ventilazione e stabilizzazione con tecnologia TAS in un essiccatoio continuo

1.3 Il modello matematico

Il trasporto di massa dell'acqua in evaporazione è dovuto alla differenza di concentrazione, e quindi alla differenza di pressione, data la temperatura costante alla temperatura di bulbo umido.

Il gradiente che esprime la variazione di contenuto d'acqua della pasta nel tempo dw/dt è espresso come:

$$\frac{dw}{dt} = K_G \times S \times (p_s - p_a); \quad (1.4)$$

dove:

w = contenuto totale d'acqua nella pasta in peso;

K_G = coefficiente di trasporto di massa;

S = superficie di evaporazione;

p_s = tensione di vapore in superficie;

p_a = tensione di vapore in aria umida.

La (1.4) può essere espressa in termini di umidità assoluta (1.7). L'umidità assoluta H , definita come la densità del vapore acqueo in una massa d'aria umida, si può esprimere come:

$$H = \frac{M_w \times p_a}{M_a (p - p_a)}; \quad (1.5)$$

dove:

M_w = peso specifico dell'acqua;

M_a = peso specifico dell'aria secca;

p = pressione dell'aria umida,

assumendo che:

$$p_a \ll p;$$

allora:

$$p - p_a \cong p.$$

L'umidità assoluta può venire allora espressa come:

$$H = \frac{M_w \times p_a}{M_a \times p}. \quad (1.6)$$

e la (1.4) diventa (Earle, 1966):

$$\frac{dw}{dt} = K_G' \times S \times (H_a - H_s); \quad (1.7)$$

dove:

$K_G' = K_G (M_a P / M_w)$ coefficiente di trasporto di massa ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$);

H_a = umidità assoluta dell'aria;

H_s = umidità assoluta alla superficie.

Il primo obiettivo dell'analisi matematica è stato il calcolo di K_G' . La (1.7) è analoga alla (1.2) di trasferimento del calore, ma non è tuttavia così agevole il suo utilizzo perché richiede che le condizioni dell'ambiente, il trasferimento di calore e la velocità di evaporazione rimangano costanti. Per poterla applicare allora si è scelto un determinato periodo del ciclo di essiccazione di durata di 20 min, in cui le condizioni dell'ambiente essiccante (temperatura ed umidità dell'aria) siano costanti, approssimando a costante la velocità di evaporazione. Si è così ottenuto il coefficiente di trasporto di massa K_G' . Esso rappresenta il flusso di acqua che viene trasferito dalla pasta all'aria nella superficie di evaporazione della pasta.

La complicata metodica per la raccolta di dati lascia tuttavia un margine di incertezza che andrebbe ridotto.

Da un'analisi sulla velocità dell'aria in flusso si può stimare in un tempo t del ciclo quale sia la quantità d'acqua K_w estratta per ogni m^3 di aria che fluisce attraverso la pasta per unità di superficie (1.8).

$$K = \frac{\Delta w}{Q_A}; \quad (1.8)$$

dove:

Δw = quantità di acqua estratta nel tempo t ;

Q_A = portata di aria, calcolata del prodotto tra velocità dell'aria e superficie di passaggio.

Questo dato è rilevante per il dimensionamento degli essiccatoi in fase di progettazione.

1.4 Funzionamento di un essiccatoio

L'essiccazione è il processo più lento e tecnologicamente difficile di tutta la produzione della pasta. Da quanto detto fin qui si evince che l'essiccazione non è una semplice estrazione d'acqua: alla fine del processo la pasta deve avere colore e consistenza adatta, non deve rompersi né nel periodo di essiccazione, né dopo che è stata confezionata. Non deve avere un sapore acidulo, deve cucinarsi in pochi minuti ma tenere la cottura. L'essiccazione della pasta lunga può durare dalle cinque alle sette ore, e nella tecnologia Pavan ad alta temperatura (HT) ed altissima temperatura (THT) è composta da due fasi, a cui corrispondono due diversi settori dell'essiccatoio: *pre-essiccazione* ed *essiccazione*.

Nella pasta lunga un componente aggiuntivo presente prima della pre-essiccazione è lo stenditore, che provvede a distribuire spaghetti o tagliatelle in della apposite canne.

I moderni essiccatoi sono costruiti in l'acciaio inossidabile per resistere all'ossidazione di un ambiente caldo e umido, inoltre sono completamente coibentati sia per aver risparmio energetico, sia per non rendere ostile l'ambiente di lavoro.

Nelle moderne linee di HT (*haute température*) e THT (*très haute température*), rispettivamente ad alta ed altissima temperatura, si è reso quasi sempre indispensabile l'inserimento di sezioni di raffreddamento (anche drastico), a causa delle elevate temperature raggiunte dalla pasta (nelle tecnologie HT si arriva fino a circa 80°C, in quelle THT si superano i 90 °C) e della velocità di processo.

1.4.1 Pre-essiccazione

Questa fase consente una diminuzione veloce dell'umidità iniziale della pasta sfruttando le proprietà plastiche della pasta, che permangono fino ad un valore di umidità del prodotto attorno al 23% ($a_w=0,9$). Successivamente lo stato elastico comporta una fase più delicata da gestire. Questo passaggio di stato meccanico della pasta avviene in modo rapido e accorcia sensibilmente i tempi complessivi di essiccazione.

Il pre-essiccatoio per pasta lunga è un tunnel che si sviluppa in un unico piano, con dimensioni congrue alla produzione oraria di pasta, preceduto dallo stenditore e collegato all'uscita con l'essiccatoio. All'interno del pre-essiccatoio la pasta viene fatta procedere in ambiente umido e ad una temperatura progressivamente più elevata, per una prima veloce disidratazione. Il calore necessario viene fornito da scambiatori di calore acqua/aria (batterie) e distribuito da gruppi di ventilazione, mentre l'eliminazione di aria umida in eccesso e la sua sostituzione con aria calda e secca avviene automaticamente.

In tutta la sezione di essiccazione, ma in particolare nel pre-essiccatoio, la distribuzione dell'aria ed i suoi flussi devono essere regolati in modo da assicurare un'uniforme e regolare perdita d'acqua da parte della pasta (Milatovic e Mondelli, 1990).

I gruppi di ventilazione sono posizionati sopra la pasta, montati contrapposti, in modo da indirizzare il flusso d'aria dalla parte superiore del tunnel verso il fondo, investendo prima le batterie e poi la pasta in tutta la sua lunghezza (Figura 1.7).

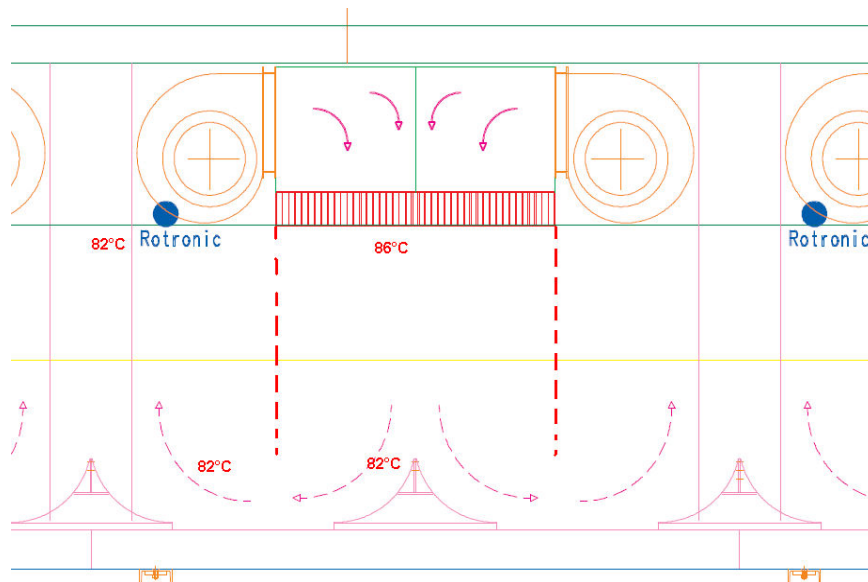


Figura 1.7 Struttura interna di un essiccatoio con gruppi di ventilazione, deflettori e batterie

Dei deflettori posti inferiormente fanno ricircolare l'aria verso l'alto e riattraversare la pasta in senso inverso fino a giungere di nuovo ai ventilatori. Il tempo di percorrenza di questa fase è di circa un ora.

1.4.2 L'essiccazione

In questa fase l'umidità della pasta scende almeno fino al 12.5 %, valore considerato conforme al termine 'secco' dato dalle normative vigenti in materia di pasta alimentare (D.P.R.09 febbraio 2001, n. 187/2001, in materia di "Denominazione di vendita delle paste secche").

La disidratazione è più lenta rispetto alla fase di pre-essiccazione, perché coinvolge gli strati più interni del prodotto. Nel processo continuo i parametri tecnologici sono impostati per zone successive dell'impianto attraverso le quali transita la pasta, trasportata da sistemi meccanici. Le condizioni ambientali sono fisse per ogni zona: vi sono zone di ventilazione e zone di rinvenimento, determinate nella fase progettuale dell'impianto. La fase di ventilazione richiede particolare attenzione: un'eccessiva ventilazione renderebbe il prodotto fragile, una ventilazione troppo bassa aumenta notevolmente i tempi di essiccazione. Un corretto processo di essiccamento deve prevedere una ventilazione via via meno intensa con il diminuire dell'umidità della pasta ed aumentare via via i tempi di rinvenimento. Le condizioni igrotermiche dell'aria devono essere costantemente adeguate all'umidità della pasta, assecondando la dinamica della disidratazione (Mondelli, 2008).

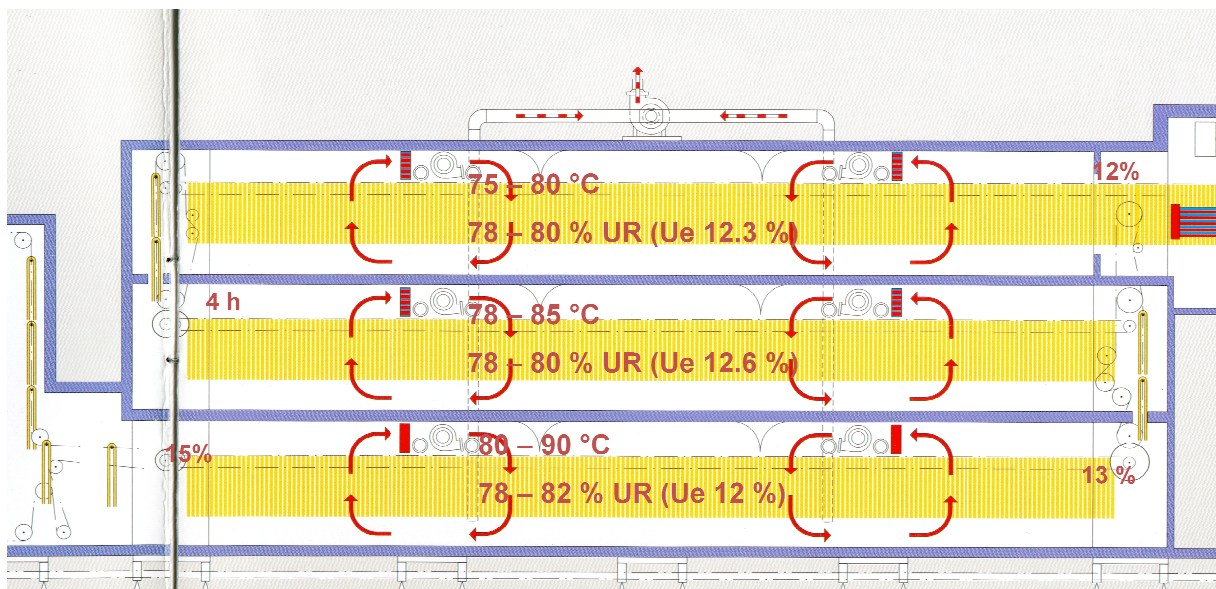


Figura 1.8 I tre piani di un essiccatoio Pavan con parametri di temperatura e umidità dell'aria

Un essiccatoio per pasta lunga Pavan (Figura 1.8) è normalmente disposto su tre piani, dotato come l'elemento che lo precede di ventilatori e batterie. Vi è inoltre un sistema di immissione del vapore nella zona finale dell'essiccatoio detta umidificatore, costituito da un circuito collegato ad uno spruzzatore e montato in prossimità delle batterie. L'ingresso del vapore è modulato da un'elettrovalvola (Milatovic e Mondelli, 1990).

Non di poco conto hanno infine i processi di *stabilizzazione e raffreddamento* (figura 1.9). Il primo avviene nel secondo e terzo piano dell'essiccatoio, a temperature elevate, per renderlo più rapida possibile. La fase di raffreddamento, che avviene immediatamente dopo l'uscita dell'essiccatoio, provvede a portare la temperatura prossima a quella ambiente evitando danni al prodotto.

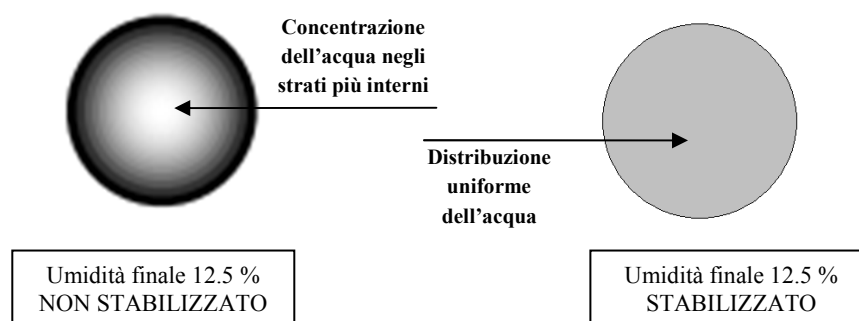


Figura 1.9 Distribuzione delle particelle d'acqua all'interno della pasta prima e dopo la stabilizzazione

1.5 Obiettivi della Tesi

Scopo della Tesi è dare un contributo allo sviluppo di tecnologie innovative nel settore dell'essiccazione della pasta. Il mercato degli impianti infatti richiede di essere sempre all'avanguardia, in continua ricerca e sviluppo di materiali e sistemi necessari per affrontare un mercato globalizzato, sempre più competitivo. In questi anni efficienza e produttività, quali sinonimi di riduzione dei costi, sono diventati bilancia dell'economicità di un processo produttivo, e un'azienda leader nel settore della produzione di macchine per la pasta come la Pavan non può non tenerne conto. Un'intera area di quest'azienda (R&S) possiede risorse professionali e mezzi per lo sviluppo e l'innovazione tecnologico, nonché la messa in pratica il collaudo e la messa a punto di macchinari per pasta, snack, pellet e altri prodotti alimentari. Nel mondo della pasta lo sviluppo di nuove tecnologie è sempre più difficile per il rapido progresso effettuato negli anni passati. L'essiccazione, soprattutto quella della pasta lunga come tagliatelle e spaghetti, può essere tuttavia un'interessante area di studio per la peculiarità del prodotto che rende più complesse le procedure come ad esempio l'elevato tempo di processo (essendosi tuttavia abbassata in 50 anni da 24 a 5 ore).

A tal proposito vi sono dei dogmi, come quello della direzione dei flussi d'aria che investono la pasta lunga in essiccazione. Si legge in un libro di Hummel, studioso inglese dei processi di pastificazione, scritto nell'anno 1966 (traduzione di chi scrive): "e la miglior via per farlo (l'essiccazione di pasta lunga, Nda) è far circolare l'aria da sopra a sotto. Alternare la direzione del flusso d'aria non è necessario durante l'essiccazione, e far circolare l'aria da sotto verso l'alto agita troppo il prodotto."

Da quando infatti la regolazione dei flussi avviene grazie a gruppi di ventilazione, l'aria calda e secca che investe la pasta è convogliata da sopra a sotto, mentre l'aria umida di ricircolo, senza più proprietà essiccanti, la investe da sotto a sopra.

Ma l'aria, caricandosi di umidità, non possiede le stesse proprietà in tutta la lunghezza dello spaghetti; ecco spiegato il motivo per cui non si può eccedere troppo nell'essiccazione: questo causerebbe venature e rotture nella pasta posta nella parte superiore delle canne.

Gli studi, svolti presso la Pavan, hanno lo scopo di verificare sperimentalmente, grazie all'uso di impianti pilota, se l'inversione alternata dei flussi di aria possa portare a miglioramenti nell'essiccazione di pasta lunga (in particolare spaghetti e tagliatelle). Si vuole perciò osservare se il tempo complessivo di essiccamento, con aria secca che investe la pasta da sopra e da sotto alternativamente, sia diminuito a parità di qualità del prodotto finale.

Queste prove sono state utili nella valutazione delle risorse da investire in questa tecnologia.

Capitolo 2

Metodo di ricerca

*“L'opera di Dante è il prodotto d'un singolare uomo di genio,
mentre gli spaghetti son l'espressione del genio collettivo del
popolo italiano»* *Giuseppe Prezzolini (1882-1982)*

In questo Capitolo sono descritti: fasi di produzione e gli impianti pilota per la produzione e l'essiccamento di spaghetti e tagliatelle, strumenti utilizzati, procedura sperimentale, variabili considerate.

2.1 La produzione degli spaghetti

Il simbolo per eccellenza della cultura gastronomica italiana, gli spaghetti, è prodotto esclusivamente con semola di grano duro ed acqua. Le fasi principali di lavorazione comprendono: dosaggio ingredienti, preparazione dell'impasto, formatura, essiccamento. Il processo industriale è continuo e costituito da impianti di alta produzione, capaci di produzione oraria che raggiunge alcune migliaia di chilogrammi. Nell'azienda dove si è realizzata la ricerca -Pavan S.r.L. di Galliera Veneta- si realizzano questo tipo di impianti. Essa è inoltre dotata di impianti pilota, mediante l'uso dei quali si è svolta la ricerca descritta in questa tesi.

L'estrusore pilota denominato F55 (figura 2.1) lavora in continuo e qui avvengono le fasi di dosaggio, impastamento e formatura. Come nelle macchine industriali le ultime due fasi avvengono sottovuoto.

Le principali parti dell'impianto pilota sono:

1. dosatore di farina e di acqua;
2. premixer;
3. mixer;
4. alimentazione forzata;
5. vite di compressione;
6. testata.



Figura 2.1 Estrusore F55 per dosaggio, impastamento e formatura degli spaghetti

2.1.1 La procedura di produzione sull'impianto pilota

Si carica a mano la semola nella tramoggia del dosatore, dal quale viene automaticamente inviata in testa ad un albero a palette rotanti di piccole dimensioni chiamato premixer. In questa parte dell'impianto, che come dice il nome serve a premiscelare gli ingredienti, viene aggiunta l'acqua tramite ugelli. La portata di acqua è regolata automaticamente per mantenere la proporzione corretta con la quantità di semola.

L'impasto di farina ed acqua ottenuto passa per caduta nella vasca di impasto, nella quale è mantenuto il vuoto grazie ad una pompa. La lavorazione dell'impasto avviene nella vasca impastatrice ad aspo rotante in un range di tempo previsto tra 5 e 15 min. Successivamente, attraverso un dispositivo di alimentazione forzata, l'impasto viene trasferito ad una vite di compressione, incamiciata in un cilindro termoregolabile, la quale spinge la pasta verso la testata. L'estrusione in una trafilatura forata bronzo-teflon consente di modellare la pasta, in formati differenti in base alla sagoma dei fori presenti sulla trafilatura. Escono così gli spaghetti, di diverso diametro, che vengono tagliati ad una lunghezza di 120 cm ca., posti su delle canne ed avviati all'essiccatoio. Tipici parametri di funzionamento sono i seguenti:

- capacità oraria massima: 40 kg/h;
- giri della vite: 25-40 rpm;
- pressione nella testata: 100-120 bar;
- pressione di vuoto: ~ -640 mmHg;
- temperatura del cilindro: ~ 35 °C.

2.2 La produzione delle tagliatelle

Le tagliatelle costituiscono un tipo di pasta laminata che si distingue da quella estrusa, come gli spaghetti, per le caratteristiche proprie: la rugosità, che si percepisce al tatto e che consente un maggiore assorbimento dei condimenti e dei sughi. Il composto per la formatura delle classiche tagliatelle prevede l'aggiunta di uova all'impasto di semola ed acqua; non sempre quest'ingrediente è stato utilizzato, per ragioni di semplicità e costanza di comparabilità di processo.

L'impianto pilota per la realizzazione di tagliatelle (in figura 2.2) è costituito da:

1. impastatrice e gramolatrice SFA 160;
2. calibratore (o laminatoio) LDC 300;
3. taglierina TCT 350.



Figura 2.2 Impianto pilota per tagliatelle (a partire da destra: impastatrice, laminatoio, taglierina)

Acqua e semola di grano duro vengono pesate e impastate in discontinuo nella vasca dell'SFA 160 per circa 15-20 min. La capacità della vasca di impasto è di circa 13 kg. L'impasto poi viene travasato, tramite una leva che fa ribaltare la vasca, alla gramolatrice. In questa macchina la pasta viene forzata a passare attraverso due rulli gramolatori con profilo ondulato, che lavora l'impasto mentre lo spinge contro una trafilatura. Passa poi attraverso una coppia di rulli laminanti, ottenendo una sfoglia con uno spessore di circa 4 mm e la larghezza di 160 mm. Successivamente la sfoglia passa al laminatoio: una doppia coppia di rulli laminanti regolabili manualmente. Giocando sulla luce tra i rulli ed utilizzando uno spessimetro portatile, strumento che permette la misurazione analogica dello spessore (incertezza dello strumento: 0.01 mm, fondo scala: 10 mm), si regola lo spessore della sfoglia in uscita a seconda delle esigenze (per le tagliatelle tipicamente da 0.8 a 1.3 mm). Le tagliatelle usate nelle prove avevano tutte uno spesso di 1.2 mm circa.

Regolato lo spessore, la sfoglia passa alla taglierina, ottenendo la definitiva forma delle tagliatelle di larghezza 4 mm che, poste su delle canne, sono pronte per la fase di essiccazione.

2.3 L'essiccamento della pasta lunga

Come detto, spaghetti e tagliatelle, una volta prodotti e posti su apposite canne, vanno collocati in un essiccatoio nel più breve tempo possibile; il contatto prolungato con l'aria modifica le proprietà, facendo incurvare e venare lo spaghetti. Le 35 canne fanno in modo che sul telaio si possano caricare fino a 20 kg di pasta. Le proprietà delle canne sono le seguenti:

- distanza fra le canne: 29.7 mm;
- lunghezza canna: 400 mm (lunghezza utile 320 mm);
- larghezza canna: 14.3 mm;
- luce tra le canne: 15.4 mm;
- quantità di pasta per canna: 375.6 g (peso al 10.5% di umidità).



Figura 2.3 Tagliatelle su canne poste all'interno della cella statica

L'essiccamento avviene in una cella statica (*static dryer*, figura 2.3) regolabile per quanto riguarda l'umidità relativa e la temperatura interna dell'aria, tramite computer ad essa collegata. Queste due proprietà dell'ambiente interno della cella vengono rilevate da una sonda tipo *rotronic hygrometer*. Essa è dotata di un sistema capacitivo per la misura

dell'umidità, che si basa sulle variazioni fisiche del suo dielettrico (polimetro igroscopico). Variazioni di umidità provocheranno variazioni (anche se minime) di capacità nel condensatore, rilevate ed amplificate da un circuito elettronico che comunica con un computer tramite un PLC (*Programmable Logic Controller*). Questo dispositivo abbina alla sonda capacitiva una termoresistenza PT100 per la rilevazione di temperatura (Milatovic e Mondelli, 1990). Da computer è possibile impostare un ciclo di essiccazione, formato da varie fasi (*step*), in ognuna delle quali vengono impostati dall'operatore i seguenti parametri:

1. tempo di durata dello *step*;
2. temperatura interna;
3. umidità relativa;
4. velocità (Hz) del ventilatore;
5. direzione di flusso del ventilatore.

L'aria all'interno della cella statica è mantenuta alla temperatura voluta da uno scambiatore di calore aria-acqua (batteria) nella quale l'acqua è riscaldata da un sistema di resistenze poste all'esterno dell'essiccatoio. Il flusso d'aria è governato da due ventilatori posti a contatto con la batteria e dotati di *inverter* che permette la marcia avanti e indietro ed a diverse velocità. Un'elettrovalvola, collegata a due ugelli, controlla la portata di vapore che entra nella cella in modo che l'umidità relativa dell'aria sia sempre quella voluta. Infine, vista l'importanza di mantenere i parametri voluti, le guarnizioni poste sulla porta e il rivestimento in poliuretano assicurano la tenuta termica e alle fughe di aria calda ed umida dell'essiccatoio.

I parametri dei cicli di essiccazione usati sono noti e copia di quelli industriali per pasta lunga ad alta temperatura. Un esempio di come variano umidità relativa e temperatura all'interno di un essiccatoio è riportato in figura 2.4.

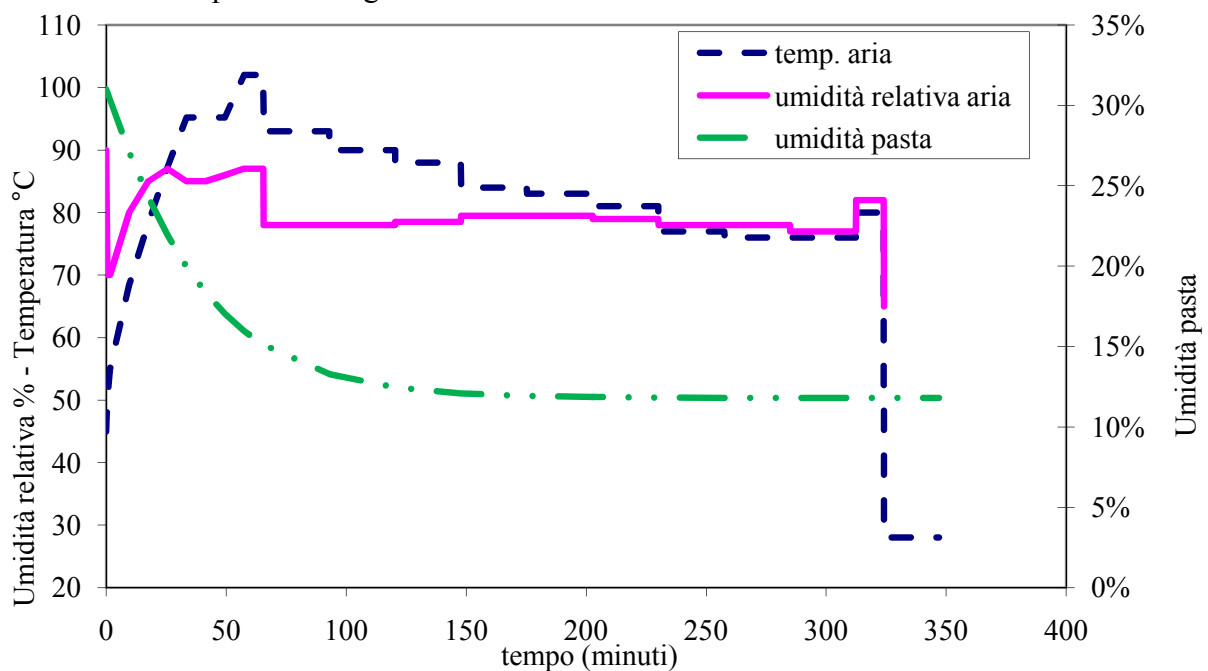


Figura 2.4 Profili nel tempo di temperatura e umidità in un ciclo industriale di essiccazione

In tabella 2.1 sono riportati in dettaglio i 9 *step* dei due cicli da 286 min (“singolo flusso” e “doppio flusso”) usati nella sperimentazione, il primo con aria che investe gli spaghetti dall’alto, il secondo con inversione e flusso dall’alto e dal basso alternativamente.

Tabella 2.1. Condizioni sperimentali nei cicli di essiccazione usati nella cella statica

Static Dryer		Singolo		Doppio			
		flusso	flusso				
Drying temperature 1° step	°C	61	61	Drying temperature 6° step	°C	80	80
Relative humidity 1° step	%	40	40	Relative humidity 6° step	%	81	81
Ventilation speed	Hz	50	50	Ventilation speed	Hz	50	50
Drying time	min	5	5	Drying time	min	40	40
Drying time right	min	0	2.5	Drying time right	min	0	5
Drying time left	min	5	2.5	Drying time left	min	40	5
Drying temperature 2° step	°C	68	68	Drying temperature 7° step	°C	77	77
Relative humidity 2° step	%	75	75	Relative humidity 7° step	%	81	81
Ventilation speed	Hz	50	50	Ventilation speed	Hz	50	50
Drying time	min	10	10	Drying time	min	29	29
Drying time right	min	0	5	Drying time right	min	0	5
Drying time left	min	10	5	Drying time left	min	29	5
Drying temperature 3° step	°C	78	78	Drying temperature 8° step	°C	76	76
Relative humidity 3° step	%	80	80	Relative humidity 8° step	%	80	80
Ventilation speed	Hz	50	50	Ventilation speed	Hz	50	50
Drying time	min	10	10	Drying time	min	77	77
Drying time right	min	0	5	Drying time right	min	0	10
Drying time left	min	10	5	Drying time left	min	77	10
Drying temperature 4° step	°C	83	83	Drying temperature 9° step	°C	74	74
Relative humidity 4° step	%	85	85	Relative humidity 9° step	%	80	80
Ventilation speed	Hz	50	50	Ventilation speed	Hz	50	50
Drying time	min	23	23	Drying time	min	67	67
Drying time right	min	0	5	Drying time right	min	0	10
Drying time left	min	23	5	Drying time left	min	67	10
Drying temperature 5° step	°C	85	85				
Relative humidity 5° step	%	88	88				
Ventilation speed	Hz	50	50				
Drying time	min	25	25				
Drying time right	min	0	5				
Drying time left	min	25	5				

2.4 Analisi di temperatura e umidità

Il monitoraggio ha previsto controlli costanti della temperatura interna della cella statica e direttamente al cuore del prodotto. Le rilevazioni sono state effettuate con termocoppie, *data loggers* e la sonda *rotronic* integrata su controllo PLC. Le sonde di temperatura a termocoppia

(figura 2.5a) sono costituite da due cavi di metalli diversi con particolari proprietà termoelettriche sulla saldatura in punta. I cavi sono all'interno di una guaina metallica ed un isolamento elettrico. Il sistema di misurazione è sensibile alle variazioni repentine di temperatura. Le termocoppie usate sono del tipo J con cavi in ferro e costantana (diametro di 0.5 mm; lunghezza 300 mm) e collegate ad un computer che rileva la temperatura nel giunto in punta allo strumento ogni 2 s. La difficoltà della rilevazione risiede in una certa abilità nell'infilare la punta della termocoppia, che ha l'aspetto di un fil di ferro molto sottile, all'interno di uno spessore di pasta di poco superiore al millimetro. Un ulteriore ostacolo è dato dal movimento di spaghetti e tagliatelle dovuto al flusso di aria essiccante con il rischio non raro di distacchi della termocoppia durante la fase di essiccazione, soprattutto nella prima fase in cui la pasta è ancora fresca.

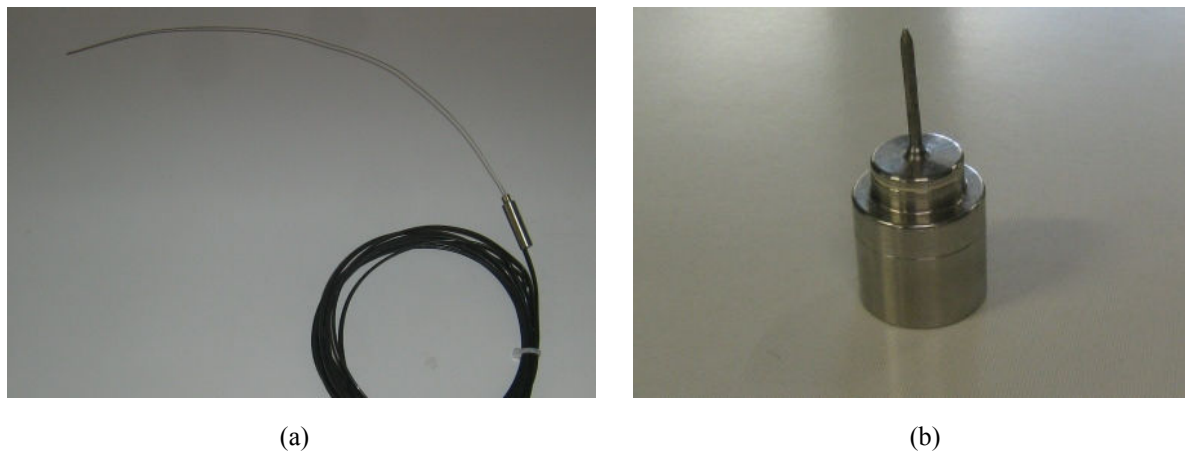


Figura 2.5 Strumenti per la rilevazione di temperatura: (a) termocoppia e (b) data loggers

I *data loggers* (figura 2.5b) sono strumenti di rilevazione di temperatura e umidità programmabili, usati in fase di processo nell'ambiente di essiccazione, di piccole dimensioni, completamente isolati, mobili e senza fili. Questi strumenti hanno una memoria che può contenere fino a 1000 misurazioni in un intervallo impostato da PC.

Il monitoraggio dell'umidità è stato effettuato con misurazioni di umidità relativa dell'aria (UR%) e misurazioni del contenuto di umidità interno alla pasta. L'umidità relativa dell'aria all'interno essiccatoio è registrata sia dai *data loggers* che dalla sonda *rotronic* propria della cella statica. Il contenuto di umidità della pasta è misurato da un analizzatore di umidità termogravimetrico detto "termobilancia" (figura 2.6), uno strumento composto da una bilancia, una lampada riscaldante e da un display che elabora e memorizza il peso del campione. È stato usato il modello Gibertini. Si opera caricando circa 4 g di campione nel piatto della bilancia; il peso viene automaticamente memorizzato, quindi si imposta la temperatura e si aziona l'avvio. La termobilancia si riscalda fino alla temperatura impostata mentre il peso scende man mano che l'umidità evapora dal campione. Essa si arresta quando il peso del campione di pasta non subisce più variazioni.



Figura 2.6 *Analizzatore di umidità termogravimetrico*

Questo sistema, semplice e veloce, per rilevare l'umidità del campione, costituisce una parte importante del controllo del processo di essiccazione.

2.5 Analisi organolettiche

Nel processo di essiccazione è determinante il controllo visivo della pasta. Viene simulata così la percezione di qualità del prodotto da parte del cliente all'atto dell'acquisto. L'osservazione accurata di uno spaghetti o di una tagliatella possono far rilevare piccoli puntini neri che indicano la presenza di impurità nella materia prima. Una farina con poche impurità è condizione per ottenere un prodotto di colore più omogeneo, considerato qualitativamente migliore. L'osservazione diretta consente di verificare anche la correttezza del processo di essiccazione: se essa è stata troppo veloce o violenta o la pasta è rimasta troppo all'aria si noteranno delle venature che percorrono lo spaghetti nella sua lunghezza e la pasta si dirà *venata*. Queste cricche sono da evitare, sono infatti lesioni che fanno spezzare la pasta alla prima sollecitazione. La causa può essere data da ventilazione con aria troppo calda e secca in fase di pre-essiccazione, prolungamento eccessivo dei cicli di ventilazione, ridotta diffusività dell'acqua all'interno del prodotto, stabilizzazione finale inadeguata o assente. Un semplice e preliminare controllo visivo può avvenire direttamente in linea, controllando le reazioni di Maillard con l'imbrunimento della pasta.

2.6 Le due fasi della ricerca

Per ragioni tecniche e di messa a punto delle prove, la ricerca è stata divisa in due fasi. È dovere precisare che questi due *step* successivi della ricerca non sono stati programmati inizialmente, ma sviluppati di volta in volta, in base ai risultati ottenuti e alle conclusioni tratte. Tuttavia essi mirano ad uno stesso macro-obiettivo, pur avendo obiettivi specifici diversi.

2.6.1 Confronto fra i profili di temperatura dell'aria e della pasta

Nella prima parte della ricerca svolta si è studiato il comportamento della pasta in essiccamento, monitorando i profili di temperatura in vari punti della pasta e l'effetto che un determinato ciclo di essiccazione aveva sulle proprietà microscopiche della pasta. La parte più onerosa, in termini di tempo, di questa fase preliminare è stata la preparazione e la sistemizzazione delle prove, per assicurarne una certa riproducibilità (e per, come si dice in gergo, “prendere mano” con una strumentazione nuova), soprattutto per i problemi di fissaggio delle termocoppie. Inoltre sono state effettuate alcune modifiche ad alcuni macchinari per renderli utilizzabili agli scopi prefissati.

In questa sezione della ricerca si sono svolti studi sia su spaghetti che su tagliatelle, di diametri e larghezze diverse. Per le tagliatelle si è partiti da un grosso spessore, non utilizzabile industrialmente, e larghezza che era prima quella di una lasagna (circa 4 cm) poi di una pappardella (1 cm), giungendo mano a mano a dimensioni consone al prodotto (4 mm larghezza, 1,2 mm spessore). Gli spaghetti erano invece di dimensioni diverse, atte a valutarne lo scambio termico: alcuni “spaghettoni” da 4 mm di diametro sono stati essiccati assieme ai classici spaghetti di diametro 1.75 mm.

Nella seconda fase gli spaghetti non sono più stati usati per le prove, ma solamente le tagliatelle laminate. La durata di una prova è di circa otto ore, tre per la preparazione della pasta e cinque per l'essiccamento.

Per comodità è assegnato un nome alle varie parti dello spaghetti riposto sulla canna: la parte superiore dove poggia sulla canna è così chiamata *testa*, mentre dalla parte opposta alla testa vi è la *coda*.

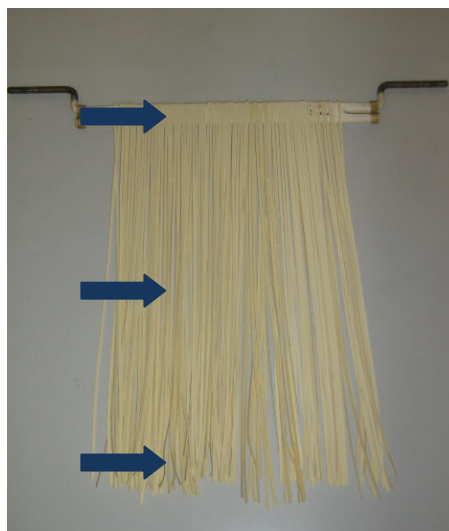


Figura 2.7 Tagliatelle su canna con indicazione del posizionamento delle termocoppie

Nel più breve tempo possibile si provvede a collocare le termocoppie nella pasta, avendo cura di posizionarle una in testa, una in coda ed una nel mezzo (come mostrato in figura 2.7): in seguito si imposta il ciclo di essiccazione e lo si avvia.

Per controllare lo stato dell'aria attorno alla pasta si sono posizionati i *data loggers*, in modo da avere allo stesso istante la temperatura dell'aria e della pasta in un sol punto. Grazie all'interfaccia computerizzata si è monitorato l'andamento della temperatura nelle tre posizioni ed elaborato i dati in un foglio calcolatore.

Per valutare la buona riuscita dell'essiccamento, al termine del ciclo si è misurata l'umidità della pasta grazie alla termobilancia e si è osservata la presenza di venature o rotture. Successivamente si sono svolte prove al microscopio ottico in laboratorio su vari i vari punti della pasta essiccata, per determinare il grado di cottura dell'amido e delle proteine.

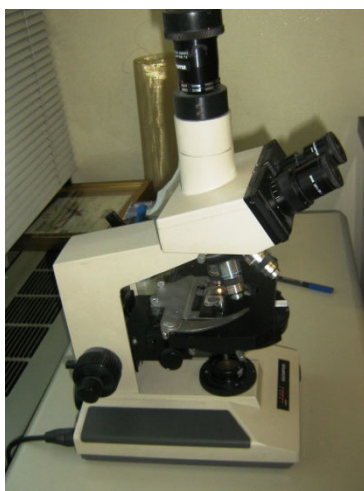


Figura 2.8 *Microscopio modello "Olympus" utilizzato nel laboratorio Pavan*

Il microscopio ottico (figura 2.8) è utilizzato con un ingrandimento di 40 volte, ed ha la possibilità di fare analisi anche con luce polarizzata.

2.6.2 I profili di umidità

In seguito ai risultati ottenuti nella prima fase, si è deciso di analizzare i profili di umidità delle tagliatelle in essiccamento in maniera costante nel tempo, e non solamente all'inizio e alla fine come si era fatto precedentemente. Questo ha occupato un tempo in azienda di due settimane. Ogni prova consisteva nel fare dei prelievi di una piccola quantità di tagliatelle alla analisi ogni 10-20 min tramite un foro appositamente praticato nella cella. Ciò che cambiava di volta in volta era solamente il ciclo, usando uno dei due precedentemente descritti. L'analisi si è concentrata specialmente nella testa e nella coda delle tagliatelle. Infine si è effettuata qualche prova di tenuta della pasta, facendola uscire anticipatamente dalla cella e osservando eventuali rotture dopo una notte a contatto con l'aria a condizioni atmosferiche. In questa fase sono state fatte alcune misure di velocità dei flussi d'aria all'interno della cella. Allo scopo è stato usato un anemometro digitale portatile, uno strumento formato da una ventola posta ad un'estremità di un'asta allungabile collegata ad un computer. Una volta posta la ventola in direzione del flusso d'aria, in maniera tale che ne sia maggiormente investita,

un'elettrocalamita trasforma la velocità di rotazione delle pale in impulsi di corrente tanto più elevati quanto maggiore è la velocità. Tali impulsi vengono inviati ad un computer che elabora il valore della velocità con una determinata frequenza di campionamento ed invia i risultati a display.

Capitolo 3

Risultati e discussione

In questo Capitolo vengono presentati i dati più significativi raccolti nelle due fasi del lavoro e una discussione degli stessi. In particolare sono calcolati alcuni parametri di funzionamento caratteristici della pasta in essiccazione.

3.1 I fase – Profili di temperatura e umidità finale

3.1.2 Confronto fra temperature nel singolo flusso e nel doppio flusso

In figura 3.1 sono riportati i dati rilevati dai *data tracer* relativi ai profili di temperatura dell'aria attorno alla pasta, in una ventilazione tipo singolo flusso (SF). L'esperimento è stato condotto su spaghetti, usando un ciclo più breve ed intenso rispetto a quello riportato in Tabella 2.1. Le temperature dell'aria in testa agli spaghetti si mantengono più elevate rispetto a quelle in coda, per buona parte del ciclo.

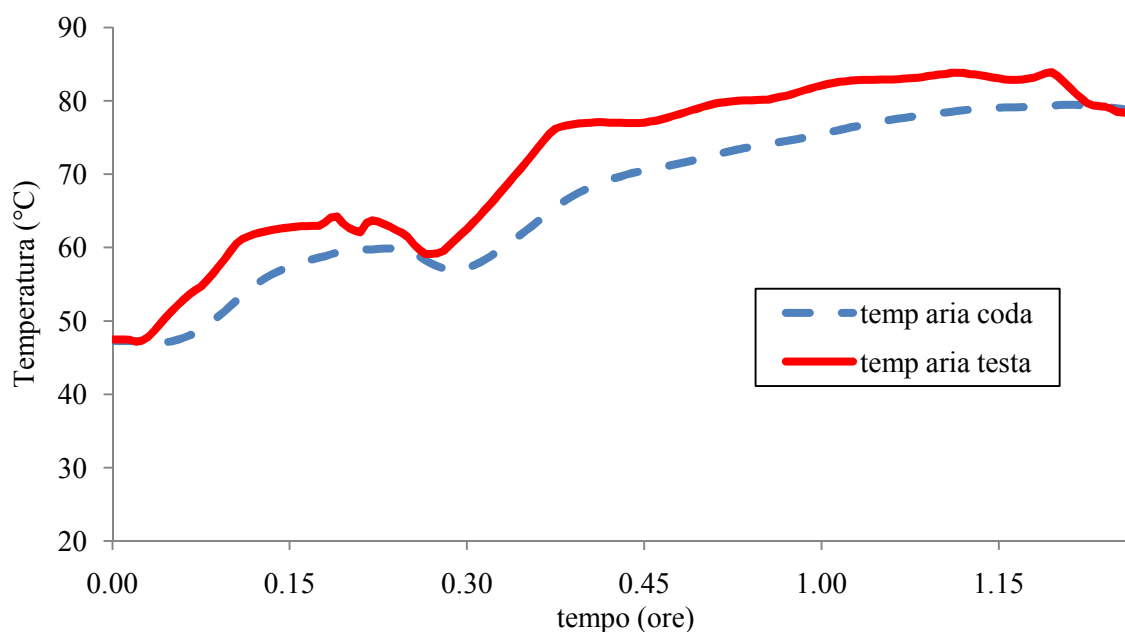


Figura 3.1 Profili nel tempo delle temperature dell'aria in testa ed in coda agli spaghetti in un ciclo di essiccazione.

Lo scarto tra le due temperature si attesta su valori fino ad 8 °C, valore notevolmente superiore sia a quello che avviene in linee continue industriali che nelle altre prove di essiccazione di pasta lunga discusse in questo studio e che si attesta invece in un intervallo di 2-4 °C. Questo risultato è stato trovato in test preliminari, in cui si sono forzate le condizioni di essiccazione, così da avere risultati con un bassi errori casuali, anche se le condizioni sono diverse da quelle industriali. Tale differenza di temperatura denota una diversa proprietà essiccative: l'aria in coda, a differenza di quella in testa, è fredda e carica d'umidità.

È stato verificato che la temperatura dell'aria attorno allo spaghetti si abbassa gradualmente procedendo nelle rilevazioni dalla testa verso la coda. Questo è stato evidenziato anche in varie prove di essiccazione di tagliatelle, nelle quali il ciclo a singolo flusso rispettava i parametri di Tabella 2.1.

Come si può osservare dai grafici di Figura 3.2 e 3.3, dove le temperature sono rilevate dalle termocoppie inserite nella pasta, la temperatura delle teste (*TEMP2* e *TEMP4*) è sempre superiore di qualche grado a quelle delle code (*TEMP5*).

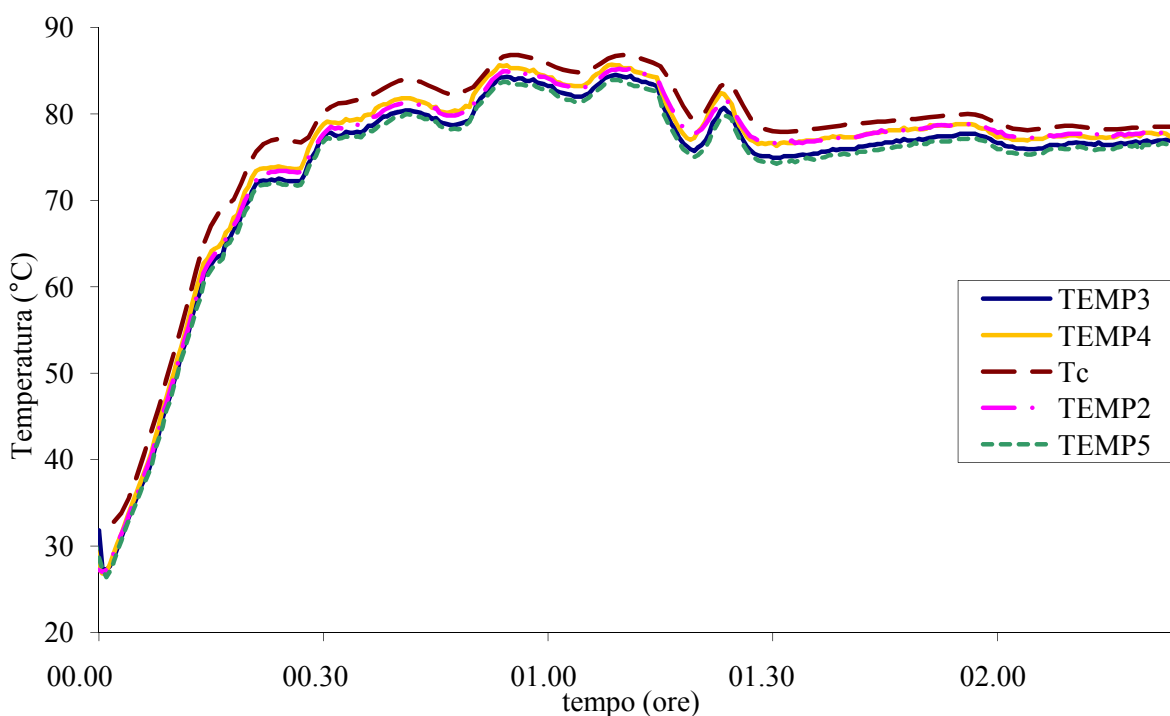


Figura 3.2 Profili nel tempo delle temperature della pasta in vari punti della tagliatella in un ciclo di essiccazione: temp2 e temp4 testa; temp3 in mezzo, temp5 in coda, Tc temperature rilevata dalla sonda Rotronic.

Si osserva infine che la temperatura dell'aria (la temperatura *Tc* è quella rilevata dalla sonda Rotronic, che si trova sopra la pasta) è sempre maggiore di quella della pasta (Figura 3.3).

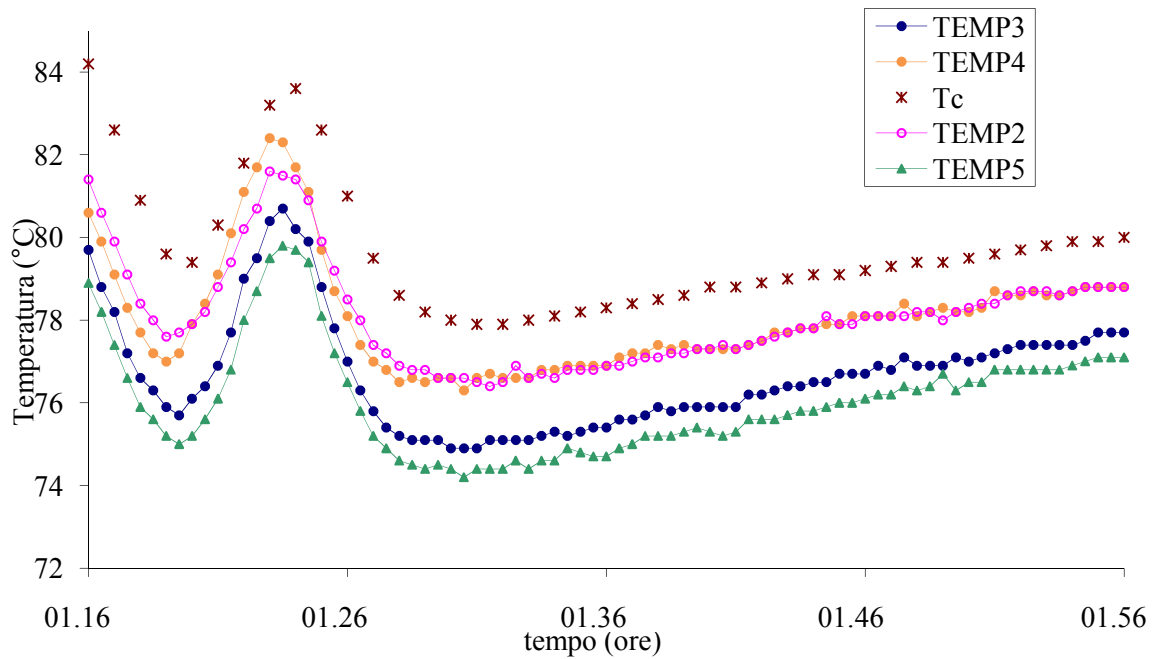


Figura 3.3 Particolare dalla Figura 3.2

Nella Figura 3.4 sono visualizzati i profili di temperatura di tagliatelle in un ciclo “doppio flusso”, nel quale i flussi d’aria sono periodicamente invertiti. La temperatura 4 è quella di una termocoppia inserita in testa alla tagliatella, la temperatura 5 è inserita in coda mentre la 3 nel mezzo. Si può notare che, in concomitanza con l’inversione del flusso, si invertono anche la temperatura di testa e di coda, essendo maggiore quella che viene investita dall’aria per prima.

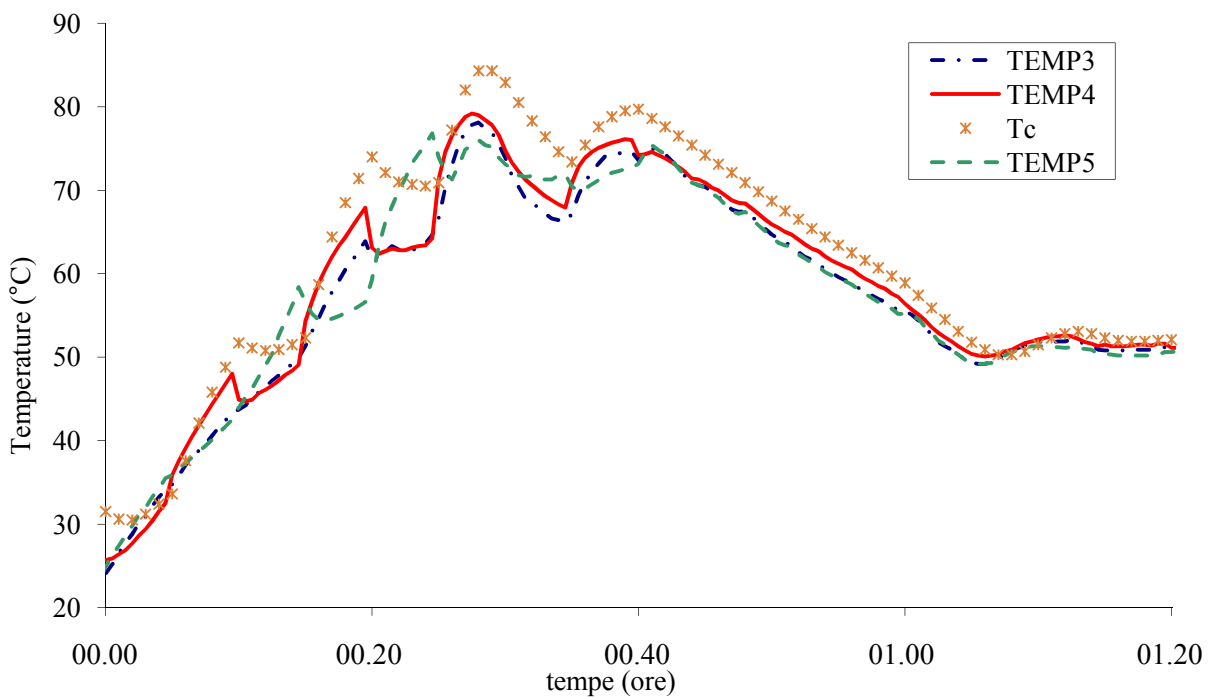


Figura 3.4 Profili di temperatura di tagliatelle in essiccazione

La temperatura T_c è quella della sonda *rotronic*. Si può capire qual è il verso dell'aria tenendo presente che T_c è maggiore quando è investita dall'aria secca e calda, mentre la temperatura tende ad abbassarsi quando la sonda è investita dall'aria umida proveniente da basso.

All'uscita dall'essiccatoio tuttavia le tagliatelle sembrano non risentire di quest'inversione. La pasta risulta a prima vista del tutto simile. Non ci sono venature né incurvamenti in coda dati dall'inversione dal flusso d'aria che proviene dal basso.

3.1.2 Analisi al microscopio - Risultati

Le osservazioni della pasta al microscopio ottico hanno evidenziato una differenza tra i due campioni che hanno subito metodi di essiccamento differenti (SF e DF). Queste analisi sono volte a osservare il grado di cottura e di gelatinizzazione dell'amido. Esse sono state svolte in testa ed in coda, esaminando i campioni sia con luce polarizzata che non.

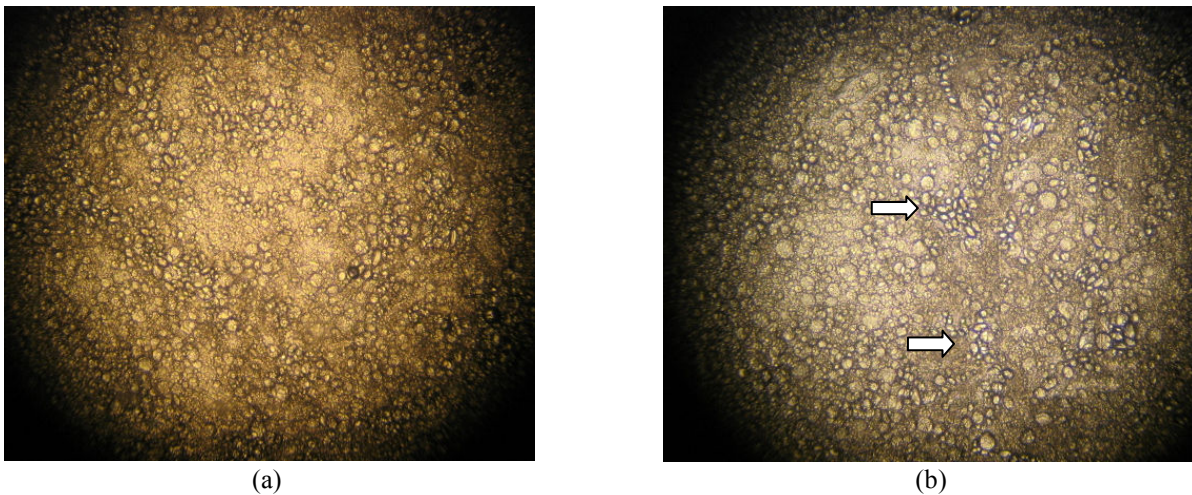


Figura 3.5 Analisi al microscopio ottico di campioni di pasta essiccati con il ciclo SF (a) in coda e (b) in testa.

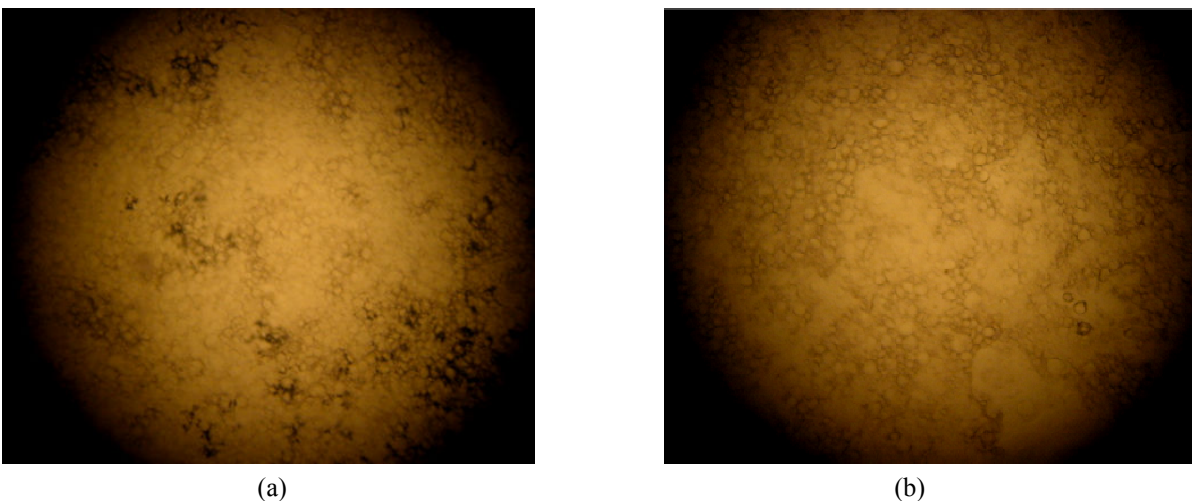


Figura 3.6 Analisi al microscopio ottico di campioni di pasta essiccati con il ciclo DF (a) in coda e (b) in testa.

Le foto in Figura 3.5 e 3.6 sono in luce non polarizzata. I piccoli globuli che si osservano sono granuli d'amido non gelatinizzati. Queste agglomerazioni si trasformano, in seguito alla gelatinizzazione, in forme ovoidali (come evidenziato dalle frecce in Figura 3.5b). La trasformazione dell'amido dalla forma a piccoli globuli a quella più ovoidale indica il suo stato di gelatinizzazione e quindi in modo indiretto l'entità del trattamento termico a cui è stata sottoposta la pasta. Le Figure 3.5a e 3.5b corrispondono all'analisi rispettivamente della coda e della testa di tagliatelle con un ciclo SF. Le due immagini, seppur simili, differiscono per un maggior numero di forme ovoidali presenti nel rilevamento effettuato in testa, a dimostrazione di un maggiore grado di cottura dell'amido in questa porzione del campione di pasta. Il processo di essiccazione, infatti, non induce sempre una gelatinizzazione dell'amido, ma solo in condizioni di elevata temperatura ed umidità.

Le immagini in Figura 3.6a e 3.6b si riferiscono invece alla coda e alla testa di tagliatelle essiccate con un ciclo DF. L'osservazione di queste immagini rivela che il grado di cottura dell'amido è molto simile nelle due parti. La controprova è stata effettuata con luce polarizzata. Questa metodica, quale indice di gelatinizzazione dell'amido, porta alla comparsa nell'ingrandimento a microscopio di croci nere, dette "croci di malta", come quella contornata da un rettangolo rosso in Figura 3.7, date da cristalli non gelatinizzati di amido.

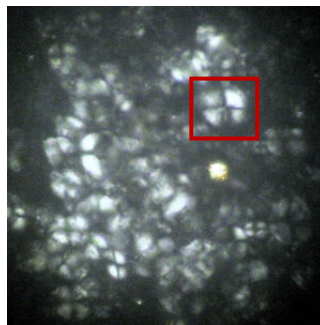


Figura 3.7 *Nel riquadro: croce di malta data un granulo d'amido non gelatinizzato (Ingrandimento 400x)*

L'assenza di queste croci e la presenza di parte scure senza croci indica una cottura e gelatinizzazione dell'amido. Le Figure 3.8a e 3.8b sono fotografie al microscopio ottico rispettivamente della coda e della testa di spaghetti essiccati con un ciclo singolo flusso.

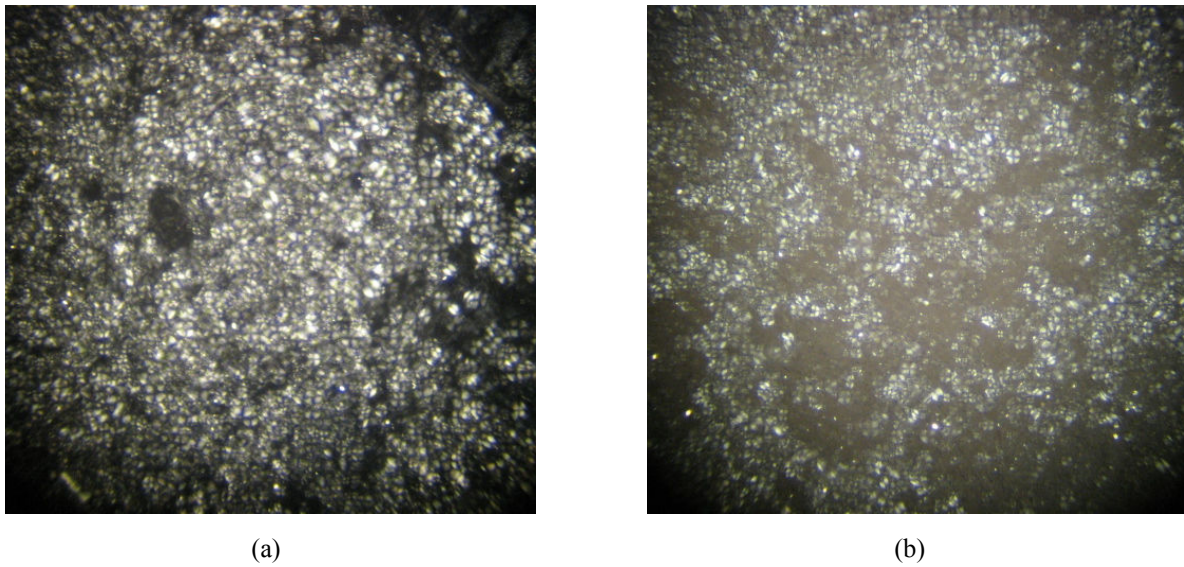


Figura 3.8 Analisi in luce polarizzata al microscopio ottico di campioni di pasta essiccati con il ciclo SF (a) in coda e (b) in testa.

Ancora una volta vi sono notevoli differenze tra le due foto, quella delle teste con poche croci e spazio vuoto, quella delle code con più croci.

Prove effettuate su spaghetti essiccati con un ciclo DF invece danno immagini molto simili, come quelle di Figura 3.9a e 3.9b, dove non si notano sostanziali differenza di spazi neri e croci.

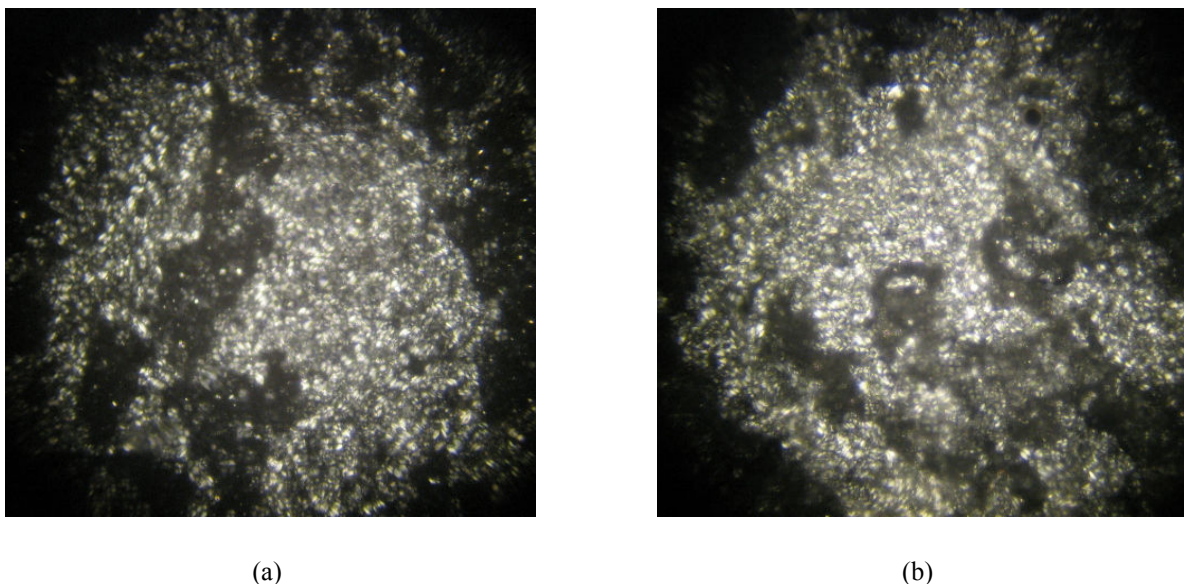


Figura 3.8 Analisi in luce polarizzata al microscopio ottico di campioni di pasta essiccati con il ciclo DF (a) in coda e (b) in testa.

Analisi di questo tipo condotte su tagliatelle e spaghetti hanno dato i medesimi risultati, ovvero una differenza significativa di gelatinizzazione dell'amido tra porzioni di testa e di

coda in un regime di SF, una differenza pressoché nulla o comunque poco significativa tra testa e coda in un ciclo DF.

Questo studio è avvalorato dal fatto che i rilevamenti sono stati effettuati in collaborazione con il Personale dell'azienda, tecnici di laboratorio con esperienza nel settore della pasta, senza che questi fossero a conoscenza degli scopi della ricerca.

3.1.3 Umidità finale

È stato dimostrato che le differenze di temperature tra testa e coda della pasta lunga in essiccazione determina una differenza nella struttura della pasta a fine ciclo se si opera con un SF, mentre non vi sono differenze se si opera con un'inversione delle temperature date dal DF. Il quesito posto a tal punto riguarda il parametro *umidità*, ipotizzando che l'inversione di flusso si rifletta positivamente sul prodotto ottenuto nei termini di umidità finale della pasta. Le analisi sono state condotte a campione, nei vari punti della pasta in entrambi i cicli di essiccazione. In Tabella 3.1 sono riportati i risultati di tali test sull'umidità finale di spaghetti e tagliatelle.

Tabella 3.1 Umidità finale e scarto tra umidità di testa e coda nel ciclo SF (il numero dopo la sigla SF indica l'esperimento)

Spaghetti	SF 12	Tagliatelle	SF 10	SF 14	SF 16	SF 20
Umidità teste (%)	8.3	Umidità teste (%)	9.35	10.04	8.68	9.15
Umidità mezzo (%)	10.3	Umidità code (%)	11.38	11.3	11.06	11.86
Umidità code (%)	10.58	Scarto tra umidità code-teste (%)	2.03	1.26	2.38	2.71
Scarto tra umidità code-teste (%)	2.28	Scarto medio (%)	2.095			

Tabella 3.2 Umidità finale e scarto tra umidità di testa e coda nel ciclo DF

Spaghetti	DF 11	Tagliatelle	DF 13	DF 18
Umidità teste (%)	8.07	Umidità teste (%)	5.48	9.6
Umidità mezzo (%)	8.51	Umidità code (%)	6.78	10.13
Umidità code (%)	8.6	Scarto tra umidità code-teste (%)	1.3	0.53
Scarto tra umidità code-teste (%)	0.53	Scarto medio (%)	0.915	

Si vuole evidenziare soprattutto lo scarto tra umidità delle code e delle teste, più che i valori di umidità a fine ciclo, sebbene siano essi, in media, più bassi nel ciclo DF. Tagliatelle e spaghetti essiccati con aria che fluisce solamente dall'alto (Tabella 3.1) presentano una disomogeneità nell'umidità delle varie parti. La pasta essiccata con il ciclo "doppio flusso" invece garantisce una maggiore omogeneità di umidità (Tabella 3.2) riportando in media una minore differenza tra le umidità finali di testa e coda. Nelle linee di essiccazione industriale la maggiore umidità delle code costituisce il parametro limitante, in quanto questa parte della

pasta come spiegato nel Capitolo 1 si essicca più lentamente, un'uniformità di essiccamento può accelerare il processo, a parità di velocità media di asporto dell'acqua.

3.2 Il fase – Profili di umidità

Le considerazioni con cui si è concluso il paragrafo precedente sono tuttavia frutto di studi esplorativi. Non si è ancora a conoscenza di come l'umidità del ciclo DF varia durante l'essiccazione, e cosa cambi tra questo ed il SF. Nell'ipotesi che le due curve di umidità della pasta nel tempo (si veda Figura 2.1) abbiano la stessa pendenza e che la curva dell'umidità della pasta nel ciclo DF si limiti a proseguire nella sua discesa fino ad un umidità finale minore, non si otterrebbe alcun vantaggio dall'uno o l'altro ciclo in termini riduzione di tempo di essiccazione. Il vantaggio si otterrebbe se la pendenza della curva di essiccazione fosse maggiore e la pasta arrivasse al valore di 12% di secco in un tempo minore.

Si riportano, in questo paragrafo, i profili di umidità nel tempo di tagliatelle essiccate con il singolo flusso e con il doppio flusso. Tutti i parametri sono stati tenuti costanti nelle varie prove, facendo particolare attenzione che l'umidità di partenza ed il numero di tagliatelle all'interno della cella statica fossero sempre costanti tra le varie prove. Sono state svolte in totale sette prove, in quattro di queste le tagliatelle sono essiccate con il doppio flusso, in tre con il singolo flusso. Sono stati rilevati i valori di umidità ogni circa 15-20 min, sia per la testa che per la coda, ed elaborati i dati con un foglio calcolatore. Sono riportati in Figura 3.10 due esempi esemplificativi dei dati raccolti.

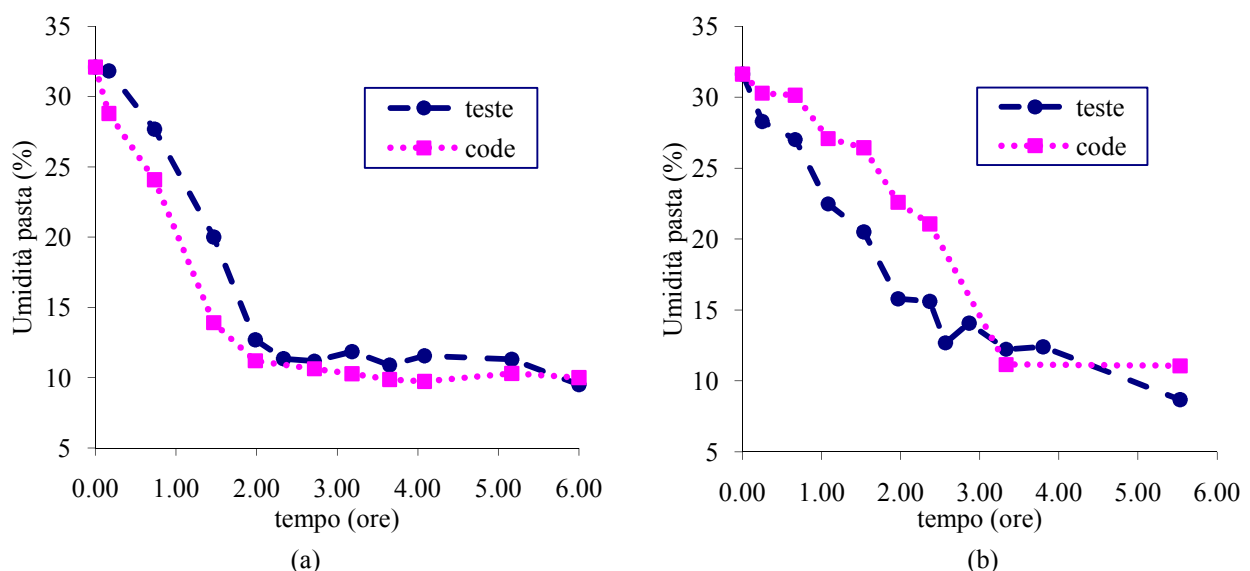


Figura 3.10 Curve di umidità di teste e code della pasta nel tempo in un ciclo (a) DF e (b) SF.

Osservando le Figure 3.10a e 3.10b si può vedere come i valori di umidità delle teste abbiano quasi lo stesso andamento nei due casi, mentre i valori riferiti alle code siano superiori per

quasi tutta la durata del ciclo con aria solamente dall'alto (confermando così quello fin qui detto), inferiore nel ciclo con aria dall'alto e dal basso.

Dalle medie tra le umidità di testa e di coda si sono elaborati le Figure 3.11 e 3.12, uno per le prove fatte in regime di DF, ed uno in SF.

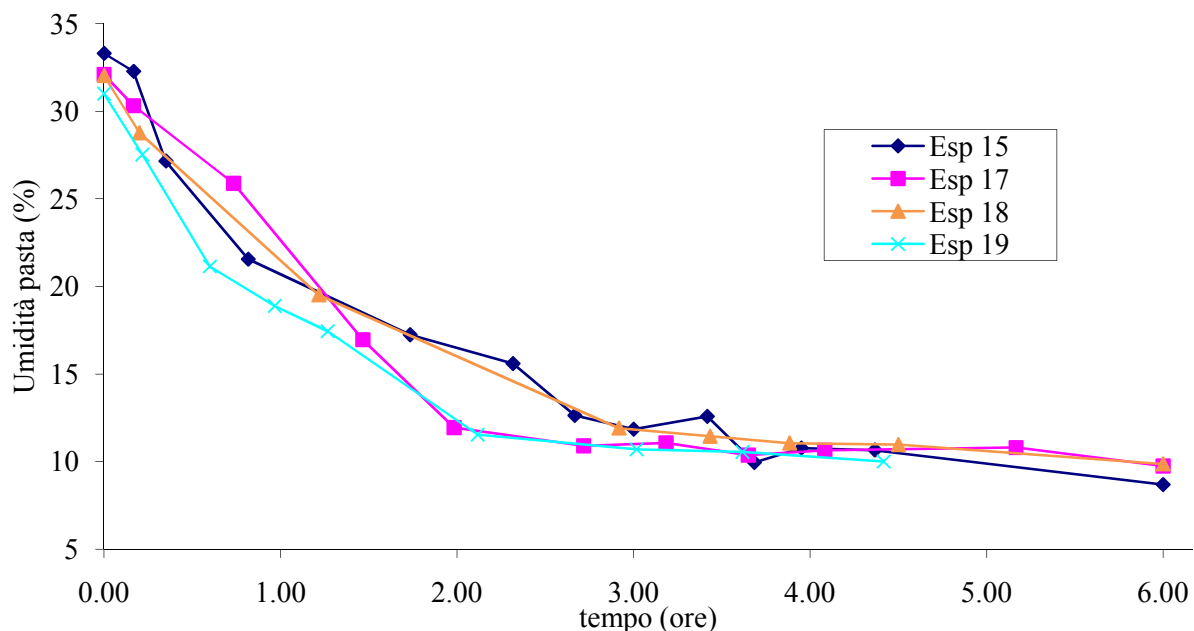


Figura 3.11 Umidità medie della pasta in vari esperimenti con ciclo DF

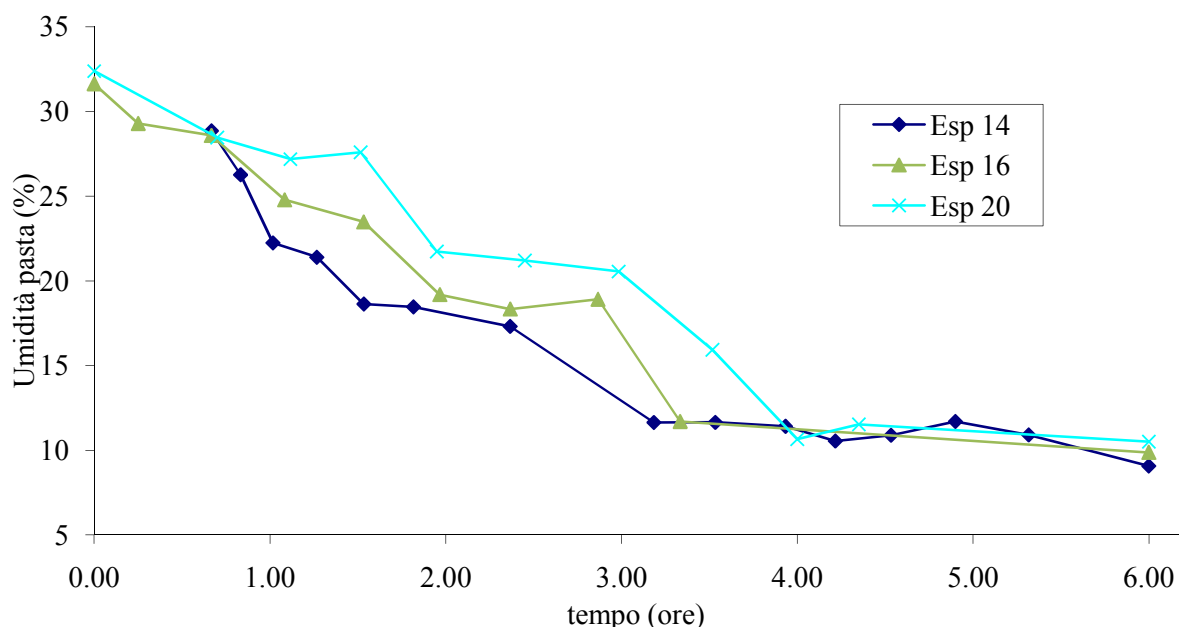


Figura 3.12 Umidità medie della pasta in vari esperimenti con ciclo SF

Nei grafici sopra riportati si osserva che il flusso dall'alto e dal basso velocizza di quasi un'ora (20% sul totale di 5 ore) il ciclo di essiccazione. Per evidenziare maggiormente questo fatto si sono elaborate due Figure (3.13 e 3.14) che riportano gli stessi dati delle Figure 3.11 e

3.12, ma per un tempo corrispondente a circa tre ore per il DF e a quattro ore per il SF. Infatti, si sono nascosti i dati al di sotto del 12 % di umidità per avere solamente la curva di discesa dell'umidità, e non quella (da 3 a 6 ore) della stabilizzazione. Inoltre si è elaborato da calcolatore una curva approssimante i dati ottenuti.

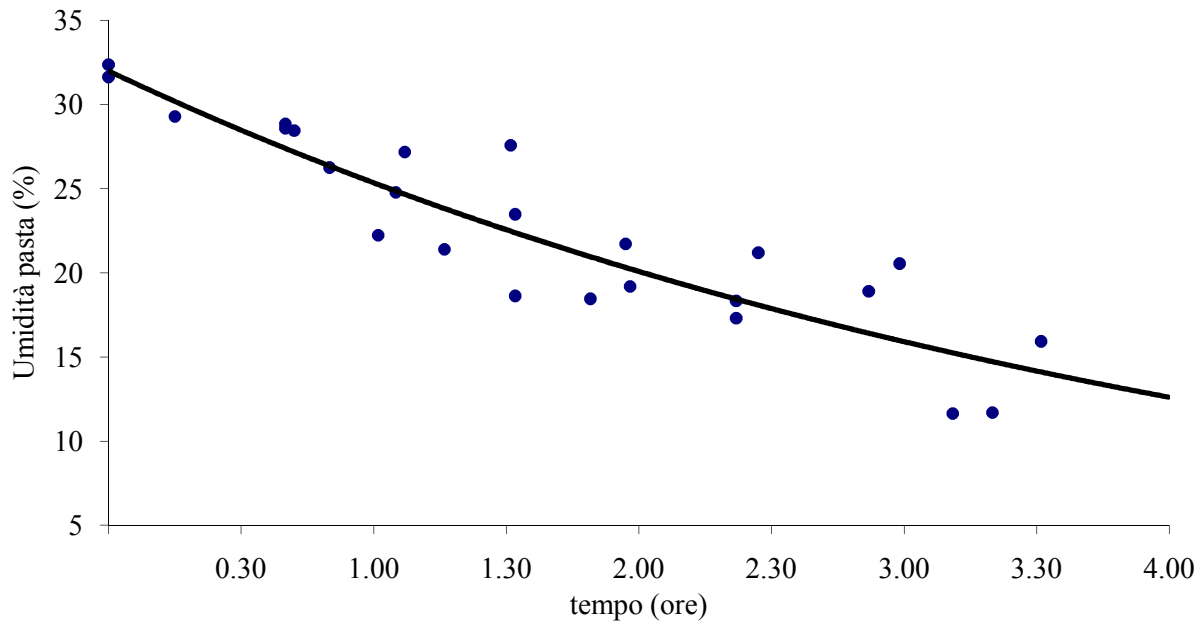


Figura 3.13 Umidità medie della pasta nelle prime 4 ore del ciclo SF con curva di interpolazione esponenziale

La curva approssimante, così come elaborata dal calcolatore, è descritta dalla (3.1):

$$U = 32 e^{-5.589 t}; \quad (3.1)$$

dove:

U = umidità sul peso secco (%);

t = tempo in giorni (d).

Grazie al calcolatore si è fatta su questa curva un'analisi statistica, calcolando il coefficiente *R Quadro*, definito come la quota di variabilità dei dati che la curva approssimante riesce a spiegare.

Per la Figura 3.13 risulta un *R Quadro* pari a 0.7808, che indica una accuratezza accettabile dei dati raccolti.

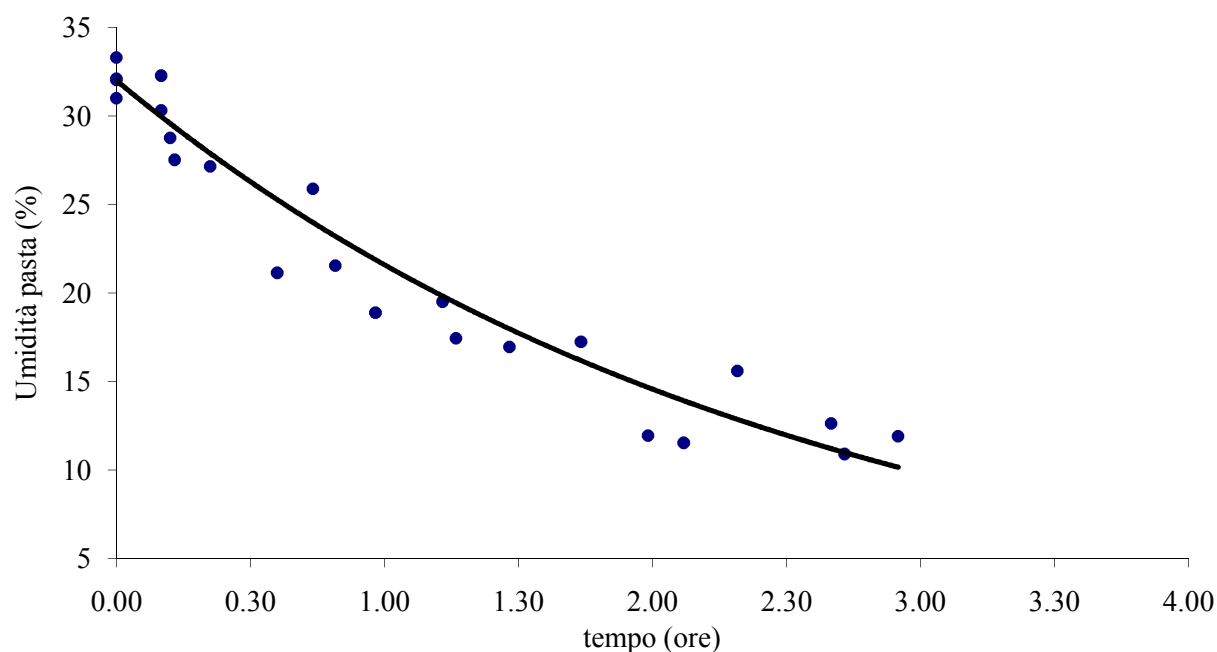


Figura 3.14 Umidità medie della pasta nelle prime 4 ore del ciclo DF con curva di interpolazione esponenziale

In Figura 3.14 la curva approssimante è descritta dalla (3.2):

$$U = 32 e^{-9.442 t}; \quad (3.2)$$

dove:

U = umidità sul peso secco (%);

t = tempo in giorni (d).

Il coefficiente *R Quadro* risulta pari a 0.922, garantendo un grado di accettabilità dei valori ancora maggiore rispetto a quello della (3.1).

Le curve esponenziale di approssimazione dei grafici di Figura 3.13 e 3.14 descrivono l'andamento medio di tutti gli esperimenti per un certo tipo di ciclo essiccativo. Il confronto tra la pendenza di queste curve sembra validare l'ipotesi che vi sia una accelerazione dell'essiccazione con un ciclo tipo DF.

Nel Capitolo 1 si è insistito su quanto delicato sia il meccanismo dell'essiccazione, e su come sia importante non essiccare troppo velocemente il prodotto per non avere cedimenti meccanici. Si può pensare allora che un ciclo di tipo DF possa rovinare la pasta data la sua più veloce essiccazione. Per assicurarsi che quest'aumento della velocità di essiccazione non creasse nella pasta venature o rotture, in tre prove, due a DF e una a SF, si sono estratte le tagliatelle dalla cella statica alla fine del ciclo, lasciandole raffreddare naturalmente a temperatura ambiente, e non facendole raffreddare lentamente all'interno della cella come è solito farsi nel caso degli esperimenti in cella statica, oppure con una ventilazione forzata di aria fredda come si suole fare sulle linee industriali per avere pasta stabile.

Questo test, che pone la pasta nelle condizioni più sfavorevoli e probanti per il raffreddamento, ha portato a confortanti risultati: la pasta, dopo una notte di riposo a temperatura ambiente, non presentava rotture ma era in linea con i parametri standard.

2.3 Analisi matematica dei dati

Si vuole calcolare il coefficiente K_G' di trasporto di materia per un flusso di aria che investe gli spaghetti dal basso verso l'alto, in un ciclo doppio flusso. Per chiarezza si riporta la (1.7):

$$\frac{dw}{dt} = K_G' \times S \times (H_a - H_s); \quad (1.7)$$

dove:

K_G' = coefficiente di trasporto di massa ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$);

H_a = umidità assoluta dell'aria;

H_s = umidità assoluta alla superficie.

Come spiegato nel § 1.3, per applicare la (1.7) è necessario che le condizioni di essiccamento siano costanti. Si è scelto come periodo di controllo nel ciclo di essiccazione di Tabella 2.1 il quinto *step*, di durata 25 min, considerato in una fascia di tempo (dopo circa 48 min dall'avvio del ciclo) in cui la velocità di essiccazione sia costante.

Per comprendere bene il perché si sia scelto di calcolare con flusso di aria che investe gli spaghetti dal basso è doveroso sottolineare che la sonda rotronic, che controlla la pasta, è posta al di sopra della pasta e viene investita dall'aria umida. Ora abbiamo bisogno di conoscere la superficie di evaporazione S , il gradiente dw/dt e l'umidità assoluta dell'aria in superficie e nel *bulk*.

La superficie di evaporazione S si calcola a partire dai dati delle canne nel § 2.3:

$$S = 4 \times \text{lunghezza pasta} \times n^\circ \text{ tagliatelle} \times n^\circ \text{ canne} \times (\text{larghezza} + \text{spessore}) \\ = 34.94 \text{ m}^2.$$

Il gradiente dw/dt lo si calcola derivando l'equazione di Figura 3.15, che rappresenta la curva di essiccamento della pasta per un DF, analoga a quella di Figura 3.14 ma con umidità riferita al peso secco e non al peso umido.

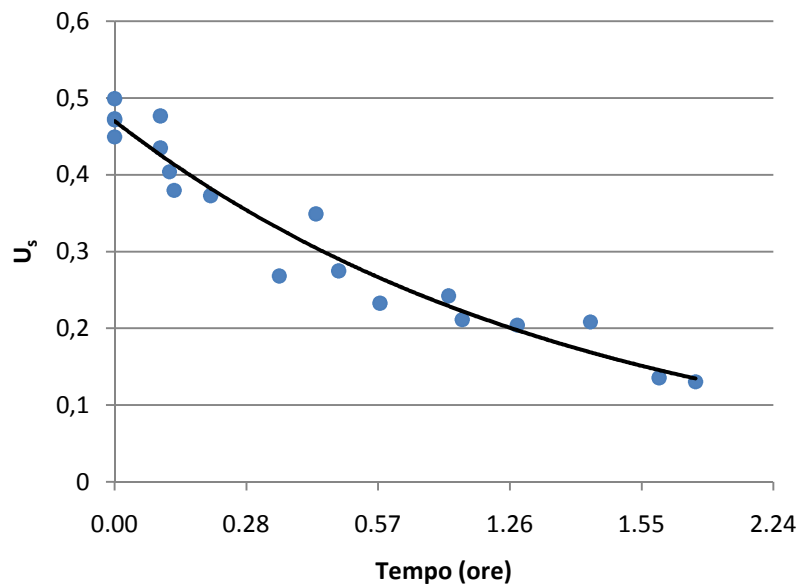


Figura 3.15 Umidità della pasta in un ciclo DF con valori di umidità calcolati sul peso secco

Per fare questo grafico si è diviso l'umidità sul peso umido U per il valore 100, così da avere una percentuale espressa tra 0 e 1, si è poi calcolato la frazione di acqua sul peso secco U_s come nella (3.3):

$$U_s = \frac{U}{1 - U}; \quad 3.3$$

dove:

U = umidità della pasta su peso umido;

U_s = umidità della pasta sul contenuto secco.

La curva approssimante di Figura 3.15 è descritta dalla (3.4):

$$U_s = 0.47e^{-14.18 t}. \quad 3.4$$

Considerando che il foglio calcolatore usa come ascissa il tempo t misurato in giorni (d), come ordinata l'umidità della pasta U_s , il gradiente di umidità (in kg di acqua asportata) su tempo risulta:

$$\frac{dw}{dt} = 0.47 \times (-14.18) \times e^{-14.18 \times t} \times 11.765 \text{ kg} = -47.00 \text{ kg/d},$$

dove:

$t = 52 \text{ min} = 0.0361 \text{ d}$.

Si è infatti moltiplicato per il peso secco della pasta (11.765 kg) per avere il peso di acqua e non più la frazione.

Per calcolare le umidità dell'aria si è scelta la Figura 3.16 dove si può vedere l'umidità e la temperatura rilevate dalla sonda rotronic in un ciclo DF. Il periodo preso in esame è racchiuso dalle due linee verticali.

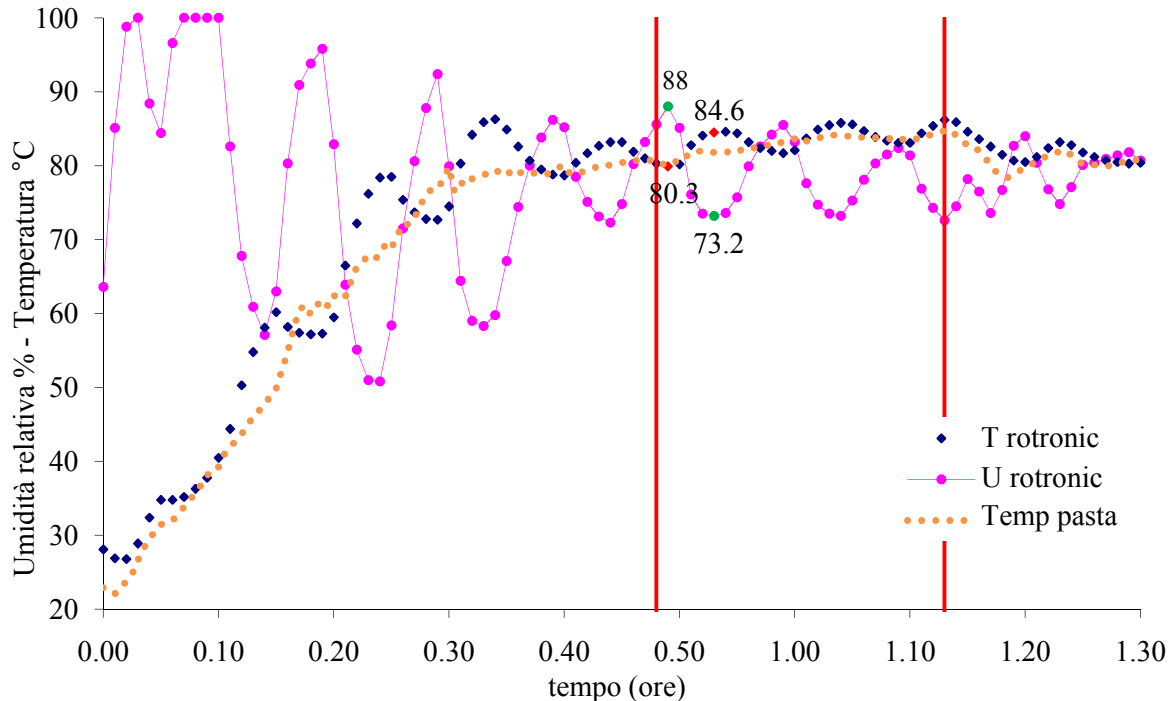


Figura 3.16 Temperatura e umidità rilevate dalla sonda rotronic e temperatura pasta

Al momento in cui comincia la parte di ciclo studiata per queste considerazioni si ha un'inversione del flusso e l'aria che sta procedendo dall'alto verso il basso inverte la direzione del suo flusso. Appena dopo l'aria che investe la sonda (minuto 49), provenendo dal basso, è carica di umidità, e investe la sonda alle stesse condizioni dell'aria che investe la superficie della pasta:

$$HR_s = 88 \%,$$

$$T_s = 80.3^\circ\text{C};$$

a cui corrisponde un'umidità assoluta di $H_s = 436 \text{ g / kg}$ (grammi di acqua su chilogrammi di aria secca).

L'approssimazione sta nel fatto di considerare l'aria dello strato a contatto con la superficie della pasta alle condizioni dell'aria carica di umidità che ha attraversato tutta la tagliatella.

Questo può essere parzialmente dimostrato dal fatto che la linea tratteggiata nera è quella di una termocoppia posta nella pasta al centro della tagliatella ed è alla stessa temperatura dell'aria.

La temperatura e l'umidità del *bulk* sono invece quelle dell'aria che deve ancora investire la pasta, è sarà più calda e meno umida. La sonda è però posta solamente in testa, quindi nell'istante (minuto 54) di una nuova inversione del flusso, (e solo in questo istante), la sonda

rileva temperatura ed umidità dell'aria che appena prima investiva prima la coda e poi la testa, e che adesso investe prima la testa della pasta dove è posizionata la sonda. Questi valori, evidenziati anche in Figura 3.16, sono:

$$HR_a = 73.2 \%,$$

$$T_a = 84.6 \text{ }^\circ\text{C};$$

a cui corrisponde un'umidità assoluta di $H_a = 424 \text{ g / kg}$.

Sostituendo questi dati nella (1.7) con le giuste unità di misura si può ottenere il coefficiente K_G' che risulta:

$$K_G' = 112.1 \text{ kg m}^{-2} \text{ d}^{-1} = 0.0778 \text{ kg m}^{-2} \text{ min}^{-1}.$$

Si è poi calcolata la quantità di acqua evaporata nei venticinque minuti del ciclo preso in esame, tra il minuto 49 e il minuto 73, grazie alla (3.4) che esprime l'umidità in funzione del tempo in Figura 3.15, dove:

$$t_{49} = 49 \text{ min} = 0.0340 \quad \Rightarrow \quad U_s = 29.02\%$$

$$t_{73} = 54 \text{ min} = 0.0507 \quad \Rightarrow \quad U_s = 22.90\%$$

Grazie al peso e all'umidità della pasta disposta sulle canne, come elencato nel paragrafo 2.3, si può calcolare che il peso totale della pasta posta ad essiccare, di 17.27 kg, al 32% di umidità.

La formula dell'umidità della pasta è:

$$U(\%) = \frac{H_2O}{SS + H_2O} \times 100. \quad 3.5$$

Trovato il contenuto secco $SS = 11.765 \text{ kg}$, dalla differenza tra il peso totale della pasta al tempo iniziale t_{49} e il peso al tempo finale t_{73} si ottiene che l'acqua evaporata è circa 0.720 kg di acqua in 25 minuti, che corrisponde a $0.0288 \text{ kg min}^{-1}$.

Infine si è stimato il flusso d'aria necessario, e la quantità d'acqua trasferita all'aria in questi venticinque minuti. La velocità media del flusso d'aria misurata dell'anemometro è di 2.5 m/s, su una superficie di passaggio di 0.1725 m^2 . La portata d'aria Q_A risulta così:

$$Q_A = S_p \times v = 0.431 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1};$$

Ciò significa che, sempre nella parte di ciclo di venticinque minuti preso in considerazione, la quantità di acqua che viene asportata ogni metro cubo di aria fluita tra la pasta risulta essere di $0.00111 \text{ kg H}_2\text{O/m}^3$ (dalla 1.8).

Conclusioni

Lo studio effettuato ha avuto l'obiettivo di analizzare le differenze tra un'essiccazione di pasta lunga con un flusso d'aria proveniente dall'alto (singolo flusso SF) ed un flusso d'aria alternato dall'alto e dal basso (doppio flusso DF). Nella prima fase dello studio sono state effettuate indagini preliminari allo scopo di mettere a punto metodi e strumenti, sulla base di vari cicli di essiccazione, della tipologia del prodotto e dei macchinari a disposizione. Si sono rilevati i profili di temperatura in vari punti della pasta (testa, centro e coda), in vari formati (tagliatelle, spaghetti) e nei diversi cicli di essiccazione, calcolando l'umidità finale della pasta in ogni processo. Si sono inoltre fatte analisi al microscopio ottico per valutare il grado di gelatinizzazione dell'amido, quale indice di cottura, nei vari punti della pasta. I risultati ottenuti sono stati confermati da tutte le prove effettuate. I rilevamenti effettuati hanno dimostrato che nel sistema DF la pasta viene sottoposta ad un'essiccazione più regolare in tutta la lunghezza della pasta, grazie al meccanismo di inversione dei flussi che generano una inversione di temperatura. Il sistema di essiccazione denominato SF invece presenta il limite di innalzare la temperatura di una parte del prodotto (testa), e mantenerla per tutta la durata del ciclo, con una conseguente diversa velocità di essiccazione tra le diverse zone, che si ripercuote nelle caratteristiche del prodotto essiccato ottenuto.

Le analisi al microscopio effettuate sulla struttura della pasta essiccata hanno dimostrato gli effetti diversi dei due cicli di essiccazione sulla struttura dell'amido. Dalle analisi sull'umidità finale si è ipotizzata una ulteriore ed importante conseguenza data dall'inversione periodica dei flussi d'aria: si è intuito cioè che anche la velocità di essiccazione è maggiore, e di conseguenza il tempo di processo abbreviato.

Alla luce dei risultati ottenuti nella prima fase dello studio, le analisi sono proseguite nello specifico con un unico formato (tagliatelle), in condizioni operative identiche ad ogni prova, mettendo a fuoco gli effetti delle due tipologie di flussi d'aria nell'essiccamento: DF e SF. I risultati ottenuti hanno confermato l'intuizione iniziale: l'umidità della pasta decresce con una derivata maggiore nel ciclo DF, diminuendo il tempo totale di essiccazione del 20-30%. In particolare, se nel ciclo SF l'umidità delle teste era rapida a scendere (rispetto al resto della pasta), e solo successivamente scendeva quella delle code, nel DF è l'umidità delle code a scendere per prima e la pendenza della curva dell'umidità nel tempo è simile in tutti i punti della pasta analizzati. Si ritiene che questa maggiore uniformità nel DF possa favorire un giorno l'avvento di un ciclo d'essiccazione più spinto, improponibile nel SF a causa delle conseguenze strutturali che subirebbe la pasta.

Sono state svolte alcune prove di resistenza della pasta all'aria (durate fino a 48 ore), togliendo dalla cella statica la pasta appena concluso il ciclo, escludendo il consueto processo

di stabilizzazione (fase di riposo all'interno della cella a temperature elevate, a fine ciclo). Questo shock termico dovrebbe provocare cedimenti strutturali ben marcati nella pasta nel giro di 24-48 ore, se essa non è stata essiccata nella maniera corretta. Non si sono però osservate differenze nella pasta essiccata con i cicli SF e DF, e in entrambi i casi la tenuta strutturale è stata dunque ottima.

La pasta è stata essiccata in regime statico, mentre le moderne linee sono continue. Per questioni operative e di caratteristiche specifiche di essiccazione del prodotto in esame, si è scelto di realizzare le prove più significative esclusivamente con il formato tagliatelle. Si ritiene che sviluppi futuri interessanti riguarderanno studi ed approfondimenti relativamente agli spaghetti, data l'incidenza economica di questo prodotto, considerati più delicati della tagliatella, avendo una superficie di essiccazione minore a parità di volume.

Ma come sarebbe possibile per un'azienda investire in una linea ex novo con queste caratteristiche, senza certezza alcuna del risultato, con dispendioso investimento? Ciò è possibile con una sperimentazione effettuata direttamente in linea. Infatti la parte di essiccamento è la fase limitante di tutto il ciclo di produzione. Dato il limitato aumento di costo, le altre fasi come l'impastamento o l'estrusione sono tutte progettate in modo che la produzione massima sia del 20-30% maggiore rispetto a quella oraria stabilita (se la macchina deve produrre 1500 kg/h la pressa può arrivare a 2000 kg/h). L'essiccatoio invece è progettato al massimo del rendimento (non è economicamente conveniente lavorare a 1500 kg/h in un essiccatoio che può fare 2000 kg/h). Si può così modificare, con un investimento ragionevole, un essiccatoio continuo già in uso e convertirlo in modo che possa attuare un ciclo con aria che arriva dall'alto e dal basso alternativamente. In questo modo, se ci dovessero essere miglioramenti, si può aumentare la produzione di quell'impianto senza dover costruirlo a partire da zero.

In una linea di pasta lunga il costo della porzione di essiccazione corrisponde mediamente al 45% del costo dell'impianto.

Il sistema oggetto dello studio ha dimostrato prima di tutto un accorciamento del tempo della prima fase (pre-essiccazione) e soprattutto una pasta che esce da questa fase con un maggiore equilibrio tra teste e code. Nello sviluppo di un essiccatoio da pasta lunga, che è direttamente proporzionale al tempo di essiccazione e quindi al costo, circa 1/5 è dedicato alla pre-essiccazione e 4/5 alla stabilizzazione.

Poter ridurre di circa il 20-30% la pre-essiccazione porta ad un evidente risparmio ma, se con il prosieguo degli esperimenti si dovesse verificare che la maggiore uniformità della pasta in uscita dal pre-essiccatoio può permettere un sensibile accorciamento anche del tempo di stabilizzazione, il vantaggio potrebbe diventare estremamente significativo, non solo in termini di costo dell'impianto ma anche di ingombro dello stesso, fattore non trascurabile quando si parla di linee che possono superare i 50 metri di lunghezza.

Riferimenti bibliografici

- Cabras, P. e A. Martelli (2004). *Chimica degli alimenti*. Piccin – Nuova libreria, Padova.
- De Cindio, B., M. Migliori, F. Carbone (1994). *Modellazione matematica del processo di essiccazione di pasta di alta qualità*. Documento interno azienda Pavan, Galliera Veneta.
- Di Leo, V. (1994). Modellazione dell'essiccazione di paste alimentari. *Tesi di laurea in ingegneria chimica*, Università degli Studi di Napoli.
- Didonè, G. e C. M. Pollini (1992). *La reazione di Maillard nelle tecnologie ad altissima temperatura*. Documento interno azienda Pavan, Galliera Veneta.
- D.P.R.09 febbraio 2001, n. 187/2001, in materia di “produzione e commercializzazione delle paste alimentari”.
- Hummel, C. (1966). *Macaroni Products* (2nd ed.). Food Trade Press, Londra.
- Lirici, O. (1999). Oltre cent'anni di essiccazione delle paste alimentari. *Tecnica molitoria*, 12, 121-152.
- Milatovic, L. e G. Mondelli (1990). *La tecnologia della pasta alimentare*. Chiriotti editori, Pinerolo.
- Mondelli, G. (2003). Elementi tecnologici fondamentali per l'essiccazione della pasta (Parte 1a). *Pasta e pastai*, 33, 18-23.
- Mondelli, G. (2008). *Essiccazione statica della pasta- Tecnologia e pratica operativa*. Edizioni Avenue media, Milano – Bologna.
- Morelli, A. (1991). *In principio era la sfoglia – Storia della pasta*. Chiriotti editori, Pinerolo.
- Zanini De Vita, O. (2010). Pasta Around the world. *Pasta e Pastai*, 87, 3.
- Zanini De Vita, O. (2009). *Encyclopedia of pasta*. California Studies in Food and Culture, Berkeley (U.S.A).

Siti web

<http://www.unipi-pasta.it/PASTADAY/CART2009/pasta01.html>,

(ultimo accesso: 24/10/2010).

<http://www.politicheagricole.it/SettoriAgroalimentari/PanePasta/defaultIntro.html>,

(ultimo accesso: 24/10/2010).

www.tc-srl.it, (ultimo accesso: 6/10/2010).

www.mesalab.com/products-service/datatreace.html, (ultimo accesso: 10/10/2010).

www.gibertini.com, (ultimo accesso: 2/10/2010).

www.pavan.it, (ultimo accesso: 24/10/2010).

Ringraziamenti

Il tirocinio, svolto da luglio a settembre 2010 presso l'azienda Pavan S.p.A., al di là del progetto specifico, mi ha permesso di realizzare un'interessante esperienza in un contesto concreto di lavoro, in un costante confronto con le peculiari e qualificate professionalità che vi operano e con le dinamiche aziendali specifiche dei diversi settori.

Vorrei ringraziare tutte le Persone che ho conosciuto e mi hanno aiutato, a volte con un tocco di piacevole ironia ... il prezzo pagato da ogni dilettante.

Vorrei ringraziare in particolar modo il dott. Luciano Mondardini per la generosa disponibilità nel rendermi partecipe della Sua professionalità ed esperienza ed il prof. Massimiliano Barolo per i preziosi consigli, la sua infinita pazienza nel seguirmi in questo progetto. Entrambi esempi, preziosi per me, di impegno professionale serio e qualificato.

