



# UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

DIPARTIMENTO DI PRINCIPI E IMPIANTI DI INGEGNERIA CHIMICA  
"I. SORGATO"

**TESI DI LAUREA IN INGEGNERIA CHIMICA**  
(Laurea triennale DM 509/99)

## **STUDIO DELL'EFFETTO DI VARIAZIONI TERMICHE SULL'UMIDITÀ DEI PRODOTTI IN ESSICCATOI PER PASTA SECCA.**

*Relatore: Prof. Andrea Claudio Santomaso*  
*Correlatore: Ing. Lucio Bresolin*

*Laureanda: Vanessa Sonda*

ANNO ACCADEMICO 2010-2011.







*Ai miei genitori.*



# Indice

<b>INDICE.....</b>	<b>1</b>
<b>INTRODUZIONE.....</b>	<b>3</b>
<b>CAPITOLO 1.....</b>	<b>5</b>
<b>PROPRIETÀ GENERALI DELL'ESSICCAZIONE .....</b>	<b>5</b>
1.1 STORIA DELL'ESSICCAZIONE. ....	5
1.2 SCOPI DELL'ESSICCAZIONE.....	5
1.3 EFFETTI DELL'ESSICCAZIONE. ....	6
1.4 METODI DI ESSICCAZIONE .....	7
1.4.1 Essiccazione attraverso corrente di aria calda.....	8
<b>CAPITOLO 2.....</b>	<b>14</b>
<b>STRUMENTAZIONE UTILIZZATA PER L'INDAGINE E RELATIVA PRECISIONE.....</b>	<b>14</b>
2.1 PRINCIPI DI FUNZIONAMENTO DELLO STRUMENTO NIR. ....	14
2.2 PRECISIONE DELLO STRUMENTO UTILIZZATO PER L'INDAGINE.....	16
<b>CAPITOLO 3.....</b>	<b>20</b>
<b>IL CASO STUDIATO .....</b>	<b>20</b>
3.1 DESCRIZIONE DEL PRODOTTO ESSICCATO. ....	20
3.2 DESCRIZIONE DELL'IMPIANTO DI ESSICCAZIONE. ....	21
3.3 PARAMETRI CHE REGOLANO L'ESSICCAZIONE.....	22
3.4 FASI DELL'ESSICCAZIONE. ....	23
3.5 CONDIZIONI DI UTILIZZO DELL'ESSICCATOIO. ....	24
3.6 REALIZZAZIONE DEL PROGETTO.....	26
3.7 RIEPILOGO DEI VALORI RICAVATI. ....	31
<b>CAPITOLO 4.....</b>	<b>34</b>
<b>RELAZIONE TECNICA SULLA VALUTAZIONE DEL RISCHIO DI FUGHE DI</b>	
<b>AMMONIACA.....</b>	<b>34</b>
4.1 DESCRIZIONE DEL PROBLEMA DA ANALIZZARE.....	34
4.2 CALCOLO DEL QUANTITATIVO EMESSO DALLA FUGA ACCIDENTALE.....	35
4.3 STUDIO SUL POSSIBILE INQUINAMENTO OLFATTIVO DOVUTO ALLA PERDITA. ....	36
4.4 STUDIO SULL'EVENTUALE POSSIBILITÀ D'INCENDIO DOVUTO ALLA FUGA DI AMMONIACA.....	41

4.5 CONCLUSIONI DELLO STUDIO EFFETTUATO. ....	43
<b>CAPITOLO 5</b> .....	<b>44</b>
<b>CONCLUSIONI</b> .....	<b>44</b>
<b>BIBLIOGRAFIA</b> .....	<b>46</b>



# Introduzione

La tesi triennale in Ingegneria Chimica riporta il lavoro compiuto durante il tirocinio sostenuto in azienda e rappresenta quindi una relazione sul progetto portato a termine durante le 300 ore dello stage.

Nel presente caso il tirocinio non è stato incentrato su un unico problema da elaborare e risolvere, bensì è stato contraddistinto da una varietà di piccole problematiche che quotidianamente vengono affrontate in un ufficio tecnico di una media azienda.

La diversità delle tematiche affrontate e i diversi strumenti che si sono potuti utilizzare nel corso del tirocinio sono stati un modo efficace per arricchire le conoscenze del tirocinante, soprattutto a livello pratico.

Si è appreso infatti che cosa comporti effettivamente il lavoro di un ingegnere all'interno di un'azienda: egli deve far fronte sia a problemi burocratici che di amministrazione e gestione della produzione, a questioni relative al coordinamento del personale che deve effettuare la manutenzione preventiva o straordinaria della produzione e, non ultimo, deve essere capace di affrontare al meglio questioni di emergenza riguardanti la produzione.

Si ritiene in ogni caso che il modo, che possiamo pure definire disorganico, nel quale è stato sostenuto il tirocinio sia risultato molto proficuo a livello personale perché ha permesso di sperimentare diverse situazioni con cui ci si dovrà di certo scontrare nel corso della carriera futura.

Al fine di scrivere una tesi si è scelto quindi di estendere soprattutto a livello teorico una delle tante problematiche che si sono affrontate nel periodo in cui lo stagista ha collaborato con l'Industria Alimentare Ferraro e di riportare una relazione tecnica redatta dalla tirocinante che fu richiesta all'ufficio tecnico dell'Azienda.

Il primo problema sviluppato in questa tesi è centrato sulle variazioni di umidità che potrebbe subire il prodotto, parliamo di pasta secca, come conseguenza di un'erronea calibrazione delle termoresistenze presenti all'interno dell'essiccatoio.

Lo scopo del progetto è quello di scoprire di che entità siano queste variazioni di umidità che subisce la sfoglia; in particolare si vuole scoprire che effetti può avere l'abbassamento di temperatura nelle diverse zone dell'essiccatoio.

Non è stato possibile infatti effettuare delle misurazioni variando in modo positivo il valore di temperatura poiché il prodotto che si andava producendo avrebbe subito delle variazioni che avrebbero compromesso la qualità dello stesso, rendendolo non più idoneo ad essere immesso sul mercato.

La seconda parte della tesi descrive gli studi effettuati su una possibile fuga di ammoniaca dall'impianto frigorifero presente all'interno dell'Azienda Alimentare Ferraro. Il calcolo fu richiesto all'azienda da parte della sezione Gas Tossici dei Vigili del Fuoco di Bassano del Grappa. L'indagine era volta a dimostrare che una eventuale fuga di gas non avrebbe comportato un effettivo rischio per la salute degli abitanti delle zone limitrofe. Per avere una stima accurata dei possibili danni che poteva provocare la perdita è stata compiuta una breve ricerca sulla storia meteorologica della zona. I dati raccolti hanno mostrato con che velocità è solito soffiare il vento e con che direzione, si è quindi analizzato il problema nei casi limite. Dallo studio effettuato è risultato che non sussiste un effettivo pericolo per la popolazione; si è però ottenuto che, alle varie condizioni, viene raggiunto il limite minimo della soglia olfattiva a poche decine di metri dal punto di perdita.

# Capitolo 1

## Proprietà generali dell'essiccazione

In questo capitolo viene descritta l'essiccazione come processo industriale e i suoi principi a livello fisico. Essa rappresenta infatti un fenomeno di trasporto simultaneo di massa e calore. Viene infine presentato un particolare tipo di essiccazione, cioè quella condotta in corrente di aria calda, poiché è la tecnica impiegata per la deidratazione della pasta nel caso studiato.

### 1.1 Storia dell'essiccazione.

Sin dall'antichità l'essiccazione ha rappresentato il metodo più utilizzato per la conservazione degli alimenti.

Per migliaia di anni l'uomo ha essiccato o affumicato pesce, carne, frutta e ortaggi col fine di accumulare scorte di cibo per tutto il periodo dell'anno. Questa tecnica di conservazione è stata scoperta sicuramente per caso, osservando il comportamento di frutti rimasti attaccati alla pianta che appassivano pur conservando molte delle loro caratteristiche, compresa la commestibilità.

Al fine di conservare gli alimenti, questi venivano lasciati essiccare anche per diversi giorni al sole e all'aria; questa pratica è tuttora utilizzata per la conservazione artigianale dei pomodori e dello stoccafisso.

La disidratazione a livello industriale si è sviluppata a partire dall'inizio del '900, sfruttando i principi basilari usati nell'antichità.

### 1.2 Scopi dell'essiccazione.

L'essiccazione dei cibi permette una più durevole conservazione di questi perché sottrae all'alimento la maggior parte dell'acqua contenuta in esso.

La presenza d'acqua infatti, in concomitanza con altri fattori come temperatura e pH adatti, così come la presenza di ossigeno, favorisce la proliferazione di batteri che comportano la putrefazione dell'alimento. Con l'essiccazione quindi si inibisce lo sviluppo di enzimi ed altri microrganismi responsabili della putrefazione dei cibi, che proliferano nella parte umida del prodotto.

Principalmente è quindi il grado di umidità del prodotto a determinarne o meno la conservazione.

In particolare la putrefazione dei cibi è dovuta alla disponibilità dell'acqua di creare legami per i processi biologici; questa disponibilità si misura in termini di attività dell'acqua, nel caso specifico della conservazione dei cibi è più appropriato parlare di acqua libera.

L'attività dell'acqua si indica con il simbolo  $a_w$  e si definisce come

$$a_w = \frac{P}{P_o} \quad (1.1)$$

dove  $P$  è la pressione di vapore esercitata dall'acqua da una soluzione o un solido umido e  $P_o$  è la pressione di vapore dell'acqua pura alle stesse condizioni di temperatura.

I micro-organismi vivono in condizioni di  $a_w$  specifiche, si nota comunque che al di sotto di un'  $a_w=0.88$  non vi è crescita batterica. Il limite standard considerato a livello industriale è  $a_w=0.6$ . Al di sotto di questo valore non vi è alcuna crescita batterica, le spore e i virus possono sopravvivere, ma non possono moltiplicarsi.

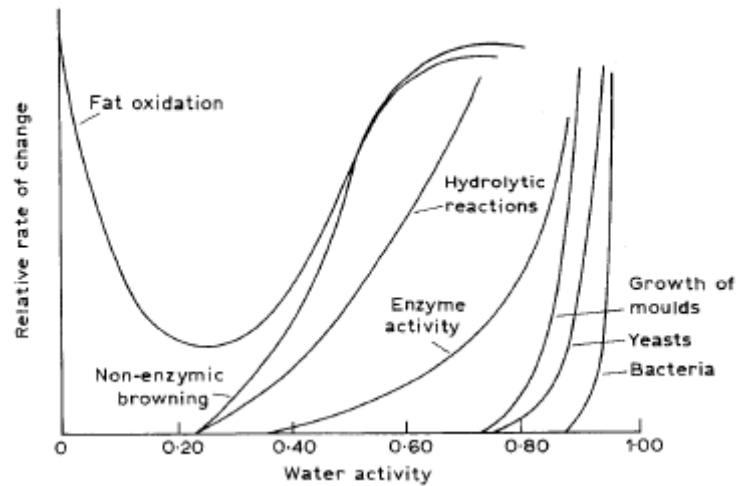
Viene ora riportato in Figura 1.1 un grafico dove viene messa in relazione la crescita microbiologica contro l'attività dell'acqua.

Ovviamente affinché l'attività dell'acqua rimanga bassa si deve provvedere ad un adeguato confezionamento.

### 1.3 Effetti dell'essiccazione.

L'essiccazione ha lo scopo principale di ridurre il quantitativo di acqua presente all'interno dell'alimento; questo però comporta delle conseguenze fisiche sul prodotto stesso come la riduzione del peso e del volume. Queste variazioni risultano positive poiché possono comportare un sostanziale risparmio relativo ai costi di trasporto e stoccaggio, e in alcuni casi, una riduzione delle spese per il confezionamento.

Queste variazioni però possono risultare anche dannose per la qualità dell'alimento. Nel caso si tratti di alimenti solidi la contrazione può alterare la forma e la dimensione del medesimo.



**Figura 1.1:** *Influenza dell'attività dell'acqua sulla stabilità microbiologica dei cibi.*

Possono avvenire inoltre delle variazioni sul colore, sul sapore e sui valori nutrizionali dell'alimento trattato. La perdita di gusto è dovuta all'evaporazione di aromi volatili, mentre per quanto riguarda le proprietà organolettiche l'essiccazione comporta una quasi totale scomparsa delle vitamine A e C, questa perdita è molto più forte nel processo di essiccazione rispetto ad altri tipi di conservazione degli alimenti come l'inscatolamento o la congelazione.

Queste modifiche nella più parte dei casi non possono venire ripristinate quantunque si proceda alla reidratazione del prodotto.

## 1.4 Metodi di essiccazione

L'essiccazione è un processo economicamente molto più oneroso rispetto ad altre tecniche per la conservazione degli alimenti, poiché necessita di grandi quantitativi di energia; per questo motivo risulta importante lavorare in condizioni ottimali col fine di limitarne i consumi energetici [Heldman et al., 2007].

L'essiccazione è spesso descritta come un simultaneo fenomeno di trasporto di massa e di calore.

Per fare in modo che avvenga l'evaporazione dell'acqua deve essere trasferito al cibo il calore sensibile e latente necessario affinché avvenga la transizione di fase dell'acqua con successivo abbandono di questa per trasferimento di massa.

Il metodo più utilizzato perché questo avvenga è sistemare il cibo in una corrente d'aria calda la cui percentuale di acqua sia di molto minore rispetto a quella nell'alimento da essiccare.

Il calore è trasferito convettivamente dall'aria alla superficie del cibo e conduttivamente all'interno di questo.

In alternativa, il cibo può essere messo in contatto con una superficie riscaldata; in questo caso il calore viene trasferito sia all'esterno che all'interno di questo per conduzione.

Si ricorda inoltre che sono presenti processi dove il calore viene somministrato come energia radiante, sfruttando le micro onde e/o le onde radio.

Infine si ha la possibilità di essiccare un alimento a basse o bassissime temperature sfruttando delle soluzioni fortemente ipertoniche nel quale viene immerso il prodotto che diminuirà la sua concentrazione d'acqua a causa di un forte fenomeno osmotico; è possibile altrimenti congelare il prodotto e sottrarre l'acqua presente attraverso una sublimazione.

Ovviamente ogni tipo di cibo dovrà essere essiccato con la tecnica che gli permetterà di mantenere maggiormente integre le sue proprietà organolettiche originali.

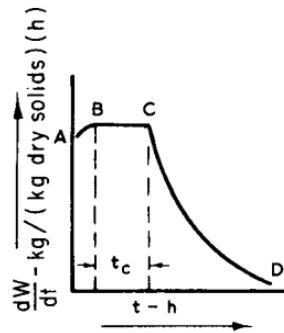
#### *1.4.1 Essiccazione attraverso corrente di aria calda.*

Quando un materiale umido viene posto all'interno di una corrente d'aria calda il calore viene trasferito sulla sua superficie principalmente per convezione.

Il vapor d'acqua che si forma viene allontanato dalla superficie attraverso lo stesso flusso d'aria.

Si consideri un modello ideale nel quale il materiale umido sia costituito da un solido inerte bagnato da acqua pura, che questo sia nella forma di una sfoglia sottile e che la corrente d'aria scorra parallelamente alla superficie di questo.

La temperatura, l'umidità dell'aria e la velocità della corrente d'aria siano mantenute costanti.



**Figura 1.2:** Curva di essiccazione per un solido umido posto in corrente d'aria calda con temperatura, umidità e velocità costanti.

Si assume inoltre che il trasferimento di calore avvenga solo su di un lato della sfoglia per soli fenomeni convettivi.

In figura 1.2 viene rappresentata la variazione di umidità di un materiale umido nel tempo.

L'andamento della curva evidenzia tre zone.

La prima zona, quella compresa tra i valori A e B, è detta di acclimatazione o “periodo di equilibrizzazione” (*equilibration period*). La superficie del solido umido raggiunge l'equilibrio con l'ambiente di essiccazione, generalmente questo periodo è molto breve rispetto alla durata totale dell'essiccazione.

La seconda zona, delimitata dai valori B e C, è definita “periodo a valore costante” (*constant rate period*). In questa fase dell'essiccazione la superficie della sfoglia è satura d'acqua: nel momento in cui l'acqua superficiale abbandona la parte esterna per evaporazione infatti l'acqua contenuta all'interno della sfoglia migra sulla superficie mantenendo lo stato di saturazione.

L'umidità del materiale in superficie si mantiene quindi costante così come la temperatura alla superficie, corrispondente alla temperatura di bulbo umido dell'aria.

La temperatura di bulbo umido (in inglese *wet bulb temperature*) è la temperatura a cui si porta l'acqua in condizioni di equilibrio di scambio convettivo con una massa d'aria in moto turbolento completamente sviluppato. Oltre alla termine temperatura di bulbo umido si fa riferimento anche alla temperatura di bulbo secco (in inglese *dry bulb temperature*). Per misurare la temperatura di bulbo umido si avvolge un termometro a mercurio con una garza imbevuta di acqua e la si investe con un flusso di aria continuo con velocità elevata in modo da essere in regime di moto pienamente turbolento. Si può

determinare così la durata del periodo a temperatura costante utilizzando un semplice modello del trasporto di massa e calore, si ottiene quindi che:

$$t_c = \frac{(W_0 - W_c)\rho_s L_s l}{h_c(\theta_a - \theta_s)} \quad (1.2)$$

dove  $t_c$  è la durata del periodo a valore di umidità costante,  $W_0$  è il valore iniziale di umidità nel solido in termini di frazione ponderale,  $W_c$  è l'umidità alla fine del periodo considerato,  $\rho_s$  è la densità del solido,  $L_s$  è il calore latente dell'aria umida alla temperatura di bulbo umido dell'aria, definita con  $\theta_s$ ,  $\theta_a$  è invece la temperatura di bulbo secco dell'aria,  $l$  è lo spessore della sfoglia e infine  $h_c$  è il coefficiente di scambio di calore trasferito convettivamente.

Dall'equazione (2.1) si nota che i fattori principali che influenzano maggiormente l'essiccazione in questa zona sono la temperatura e umidità dell'aria e l'estensione della superficie trattata. Anche la velocità dell'aria influenza il fenomeno dato che all'aumentare di questa si ha un coefficiente di scambio più elevato. Fintanto che persiste questa fase di equilibrio, l'essiccazione consente di evaporare grandi quantità di liquido senza che il solido vada in surriscaldamento. Nel caso in cui si tratti un alimento termo-sensibile, risulta molto importante mantenersi in questa fase onde evitare la degradazione del prodotto. Questo periodo solitamente risulta molto breve per molte sostanze, tanto che nella maggior parte dei casi può essere trascurato.

Col procedere dell'essiccazione si raggiunge il punto C (Fig.2) nel quale il movimento dell'acqua all'esterno non è sufficiente a mantenere la superficie in condizioni di saturazione. L'equilibrio che si era instaurato cessa e la quantità di liquido evaporato nell'unità di tempo diminuisce, si ha quindi una diminuzione dell'efficienza di essiccazione. Il punto C è noto come punto critico e la fase seguente, compresa nell'intervallo CD, è chiamata fase di andamento discendente (*falling rate period*). Dal punto C in poi, la temperatura sulla superficie della sfoglia aumenta e si avvicina alla temperatura di bulbo secco dell'aria via via che l'essiccazione giunge a compimento. Solitamente il processo di essiccazione avviene principalmente in questa fase, dove i fattori che influenzano maggiormente il processo sono quelli che governano il movimento dell'acqua all'interno della sfoglia. Sono stati prodotti molti modelli matematici per la descrizione della fase discendente; molti di questi sono empirici e sono stati sviluppati interpolando dati ottenuti per via sperimentale. Altri sono basati



sul fatto che il movimento dell'umidità all'interno del solido avviene secondo un meccanismo particolare. Tra questi ultimi il più noto è quello che si basa sull'ipotesi che la migrazione dell'acqua avvenga per diffusione come risultato della differenza di umidità che si crea tra l'interno e la superficie del solido. La legge che governa questo fenomeno è la seconda legge di Fick ed è descritta dalla formula

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}. \quad (1.3)$$

Nel caso in esame si considera il problema unidimensionale poiché il gradiente di concentrazione si sviluppa maggiormente in direzione dello spessore della sfoglia. L'applicazione della legge a questo caso porta alla soluzione

$$\frac{W - W_e}{W_c - W_e} = \frac{8}{\pi^2} \left[ \exp \left\{ -Dt \left( \frac{\pi}{2l} \right)^2 \right\} \right] \quad (1.4)$$

dove  $W$  è il contenuto di acqua al tempo  $t$ ,  $W_e$  è il contenuto d'acqua all'equilibrio,  $W_c$  è il contenuto d'acqua all'inizio della fase con andamento discendente (punto critico C),  $l$  è lo spessore della sfoglia. Nelle equazioni (2.2) e (2.3) si considera il coefficiente di diffusione  $D$  costante anche se modelli più raffinati lo considerano decrescente al diminuire del contenuto di umidità.

Ad ogni modo molti altri fattori entrano in gioco nell'essiccazione del prodotto: ad esempio la contrazione, che altera le dimensioni del prodotto; la presenza di membrane cellulari che alterano lo spostamento dell'acqua nel solido. A causa dell'essiccazione si hanno inoltre variazioni di proprietà fisiche come la densità, la porosità, il calore specifico e la conducibilità termica. Si cita infine il fenomeno di *hardening* che indica una riduzione della superficie utile all'evaporazione. L'acqua infatti spostandosi verso la superficie contiene materiali in essa solubili come sali o zuccheri che, una volta accumulati in superficie, possono creare una barriera che disturba l'evaporazione dell'umidità residua. Il modello di diffusione di Fick che abbiamo considerato non tiene conto di tutti questi fattori correttivi, nonostante ciò l'andamento della curva risulta sufficientemente attendibile ai nostri scopi.





# Capitolo 2

## Strumentazione utilizzata per l'indagine e relativa precisione

In questo capitolo verranno descritti gli strumenti utilizzati per rilevare l'umidità della sfoglia e si riporterà un breve studio sulla precisione dei valori raccolti.

### 2.1 Principi di funzionamento dello strumento NIR.

Lo strumento utilizzato per stabilire il quantitativo d'acqua contenuto nella sfoglia è lo spettroscopio NIR, acronimo di Near Infra-Red.

La spettroscopia NIR è una tecnica molto utilizzata nell'industria agroalimentare come mezzo per il controllo della qualità e dei processi industriali. Il suo ampio utilizzo è dovuto al fatto che questo tipo di analisi comporta dei vantaggi notevoli: il campione da analizzare non deve subire nessun pretrattamento; vi è la possibilità di eseguire ripetute misurazioni sullo stesso campione; con una singola analisi si possono predire diversi parametri fisici e chimici.

In generale, la spettroscopia si basa sull'interazione tra radiazione elettromagnetica e materia. Essa viene utilizzata per indicare la rivelazione e la registrazione di variazioni di energia, individuate come di picchi di risonanza, che interessano nuclei, atomi o intere molecole.

Quando un fascio di radiazioni è fatto passare attraverso una sostanza, l'intensità della radiazione incidente  $I^0$  sarà maggiore di quella della radiazione emergente  $I$ . Una parte della radiazione incidente, invece di essere trasmessa, è stata quindi assorbita dalle molecole che contengono il campione, diffusa o riflessa dal campione a una lunghezza d'onda diversa.

L'assorbimento è governato dalla legge di Lambert-Beer:

$$I = I^0 \exp(-kxC) \quad (4.1)$$

con  $I$  intensità del raggio emergente,  $I^0$  intensità del raggio incidente,  $k$ ,  $x$  e  $C$  rispettivamente coefficiente di assorbimento, cammino ottico e concentrazione della sostanza.

Le lunghezze d'onda caratteristiche di assorbimento sono associate a moti vibrazionali delle molecole. Le specifiche caratteristiche di assorbimento di energia da parte di un materiale sono uno dei più importanti sistemi di identificazione presenti in natura. In questo modo si riesce quindi ad identificare la sostanza che ha procurato quel particolare assorbimento.

La spettroscopia si ottiene quindi proiettando una radiazione elettromagnetica di intensità nota su un campione, raccogliendo una parte di radiazione (trasmessa, riflessa o riemessa) e inviando quanto raccolto a un rivelatore.

Uno spettrofotometro è generalmente composto da una sorgente di luce, un monocromatore, un campionatore o una interfaccia per la presentazione del campione e un detector per le misure in riflettenza e trasmittanza il tutto gestito da un PC.

Per quanto riguarda la spettroscopia NIR, questa copre l'intervallo di lunghezze d'onda tra 780 e 2526 nm.

Le bande di assorbimento più significative in questa distanza sono attribuite alle combinazioni di vibrazioni fondamentali relative ai gruppi funzionali -CH, -NH, -OH; esse sono tipicamente molto ampie e sovrapposte e risultano 10-100 volte più deboli rispetto alle loro bande corrispondenti nel medio infrarosso.



**Figura 2.1:** Spettroscopio NIR utilizzato per analizzare le sfoglie di pasta.

Affinché uno spettrofotometro NIR possa fare una analisi quantitativa è necessario sviluppare una calibrazione specifica per la sostanza che si intende analizzare.

## **2.2 Precisione dello strumento utilizzato per l'indagine.**

Si vuole calcolare l'errore che comporta la misurazione sull'analisi che si va conducendo. Per fare ciò è stata presa una confezione di lasagne già confezionate, sono

state triturate una ad una al fine di non avere contaminazione tra le stesse e dopo aver prelevato da ogni campione la giusta quantità, circa 5 grammi, la si è posta nello strumento.

**Tabella 2.1:** *Umidità misurate su sfoglie provenienti dalla stessa confezione, relativa media aritmetica delle misurazioni e deviazione standard.*

<b>PROVA</b>	<b>Umidità, %</b>
1	11,721
2	11,495
3	11,661
4	11,626
5	11,691
6	11,635
7	11,786
8	11,745
9	11,752
10	11,630
<b>Media</b>	11,674
<b>Deviazione standard</b>	0,0844
<b>Coefficiente di variazione</b>	0,723%

Come mostra la Tabella 2.1 la precisione dello strumento è buona, poiché l'ordine di grandezza della deviazione standard è di  $10^{-2}$ . L'errore dovuto alla misurazione risulta trascurabile per gli scopi dell'analisi che si sta conducendo; si può quindi ritenere lo strumento sufficientemente affidabile, il coefficiente di variazione risulta infatti inferiore all'1%.

Una maggior dispersione si ha invece quando si mettono a confronto misurazioni effettuate su lasagne raccolte durante il percorso di essiccazione dallo stesso punto di prelievo. Misurando l'umidità di ogni sfoglia i risultati sono riportati in Tabella 2.2.

Le misurazioni in questo caso risultano meno precise. Lo scarto quadratico medio infatti è più consistente e l'indice di dispersione risulta essere più che doppio di quello calcolato in Tabella 2.1.

Lo minor precisione ottenuta è probabilmente attribuibile al tempo che intercorre tra il prelievo e la misurazione. Nelle condizioni in cui viene esaminata la sfoglia, il suo valore di umidità risulta poco stabile probabilmente a causa dell'alta temperatura in cui

si trova il campione quando viene prelevato. La sfoglia quindi risulta più influenzabile dalle variazioni ambientali che si hanno nel tempo che intercorre tra il prelievo e la misurazione. In ogni caso l'errore relativo massimo è accettabile. Si riesce ugualmente ad avere una stima affidabile dell'analisi di umidità provvedendo ad effettuare una media su almeno tre campioni prelevati.

**Tabella 2.2:** *Umidità misurate dalle sfoglie provenienti dalla stessa fase di essiccazione, relativa media aritmetica e deviazione standard.*

<b>PROVA</b>	<b>Umidità, %</b>
1	12,068
2	12,373
3	12,625
4	12,166
5	12,556
6	12,827
7	12,474
8	12,659
9	12,374
10	12,365
<b>Media</b>	12,4487
<b>Deviazione standard</b>	0,229429268
<b>Coefficiente di variazione</b>	1,843%





# Capitolo 3

## Il caso studiato

### 3.1 Descrizione del prodotto essiccato.

La pasta è un prodotto alimentare costituito da miscele di farine o semole con acqua. Il termine pasta proviene dal greco *πάστα* che significa 'farina con salsa'.

Le origini della pasta, se intesa come miscela di cereali macinati e cotti o essiccati al fine di conservarli più a lungo, risale sino all'età neolitica.

La pasta nel corso dei secoli diviene un alimento universale di cui si hanno riferimenti nella storia in tutto il continente euroasiatico.

Nel caso studiato si ha la lavorazione di pasta secca senza uovo; in base alla normativa italiana essa è ottenuta dalla trafilazione, laminazione e conseguente essiccamento di un impasto preparato esclusivamente con semole di grano duro e acqua.

La semola è un prodotto granulare ottenuto dalla macinazione e successiva setacciatura del grano duro, depurato da impurità.

Questa viene lavorata con acqua pura per far sì che l'amido e le proteine sostenute nella semola si trasformino in glutine. L'impasto ottenuto inizia a presentare una certa elasticità, compattezza, risulta composto di sola acqua e semola di grano e per legge non può contenere additivo alcuno: questa fase della lavorazione viene definita gramolatura.

Una volta pronto l'impasto, è possibile procedere ad inserirlo nelle sfogliatrici per ottenere una sfoglia sottile che viene tagliata meccanicamente a formare le lasagne che subiranno la fase dell'essiccazione. La fase finale di questo processo è il raffreddamento, che deve portare a temperatura ambiente la pasta che è ancora sottoposta alla temperatura relativa all'essiccazione.

A questo punto il prodotto è pronto per essere confezionato: la pasta viene inserita, sempre grazie a processi automatizzati, in sacchetti di plastica o contenitori in cartone, per proteggere la pasta da eventuali contaminazioni con agenti esterni, oltre che presentare il prodotto finale confezionato per il consumatore.

La pasta secca prodotta a livello industriale deve sottostare alle normative imposte dalla legge italiana. Esse impongono che il prodotto sia costituito solo da semola di grano duro e acqua, senza alcuna aggiunta di additivi; che l'umidità contenuta sia inferiore al 12,50% in peso; che le ceneri presenti all'interno abbiano un valore massimo di 0,90% in peso.

### **3.2 Descrizione dell'impianto di essiccazione.**

L'essiccazione avviene in un essiccatoio a tunnel di tipo continuo. Il prodotto si sposta all'interno dell'essiccatoio su dei telai di nylon con struttura in acciaio inox movimentati meccanicamente. I telai procedono nell'essiccatoio nel quale vengono mantenute condizioni ambientali differenti. In particolare a variare sono la temperatura e l'umidità relativa dell'ambiente. Questi cambiamenti sono necessari affinché la sfoglia di pasta nel suo progressivo essiccamento non subisca delle contrazioni tali da causare delle fratture nella sfoglia.



**Figura 3.1:** *Impianto di essiccazione in funzione nell'Azienda Alimentare Ferraro.*

L'impianto viene percorso in senso verticale al fine di sfruttare l'altezza dello stabilimento e rendere minime le esigenze di spazio. I carrelli vengono caricati dalle macchine sfogliatrici prima di entrare nell'essiccatoio, dopo aver attraversato l'essiccatoio le lasagne sono prelevate meccanicamente da ventose e mandate al processo di imballaggio. I telai svuotati percorrono a ritroso l'impianto scorrendo al fondo dell'essiccatoio per poi compiere nuovamente la loro funzione.

L'essiccatoio è diviso in vari scomparti, si hanno complessivamente 8 salite e 8 discese dei telai. Nello specifico si ha una salita nel primo scomparto, 6 salite nel secondo e una in quello finale.

### **3.3 Parametri che regolano l'essiccazione.**

Le variabili che influenzano l'efficacia dell'essiccazione, quali il tempo di permanenza, l'umidità e la temperatura dell'aria, vengono regolati e mantenuti costanti da appositi sistemi di controllo, mentre la ventilazione dell'aria, essenziale anch'essa ai fini dell'impianto, risulta fissata.

Sono presenti 5 rivelatori per misurare l'umidità dell'aria e altrettanti per la temperatura ad intervalli regolari lungo tutto l'essiccatoio.

Per mantenere il valore predeterminato delle condizioni di processo viene utilizzato un sistema di "regolazione automatica".

Il sistema usato per la misura della temperatura all'interno della linea di essiccazione si basa su termoresistenze, ovvero elementi metallici a resistenza variabile. Le termoresistenze sono costituite normalmente da un sottile filo di platino avvolto su un supporto isolante ed inerte termicamente. La resistenza del filo di platino varia in funzione della temperatura. Attraverso una specifica calibrazione si riesce ad ottenere il valore della temperatura.

Per la misura dell'umidità dell'aria si utilizza uno strumento a sensori capacitivi. Esso si basa sulle variazioni fisiche del dielettrico, cioè del materiale interposto tra due conduttori a cui viene sottoposta una differenza di potenziale. Il dielettrico utilizzato a questo scopo è un materiale igroscopico, capace cioè di assorbire l'acqua presente nell'ambiente. Il condensatore così costituito risente quindi dell'umidità dell'aria. In questo modo varia la capacità del condensatore che una volta rilevata fornisce una

misura della percentuale d'acqua presente nell'essiccatoio. Per regolare l'umidità il sistema di controllo comanda degli sfiati che si aprono automaticamente ogni qual volta l'umidità all'interno dell'essiccatoio risulti maggiore di quella di set-point permettendo l'uscita all'ambiente del vapore in eccesso, una volta raggiunto il valore impostato la valvola si chiude mantenendo all'interno il vapore che si genera dall'essiccazione della pasta.

### **3.4 Fasi dell'essiccazione.**

Le fasi tecnologiche dell'essiccazione sono tre: incartamento, essiccazione, raffreddamento. Le tre zone sono divise fisicamente l'una dall'altra, collegate solo in parte per permettere il passaggio dei telai che trasportano la sfoglia da una zona all'altra.

Nella prima fase la pasta si trova allo stato plastico con un'umidità relativa in peso del 30% circa, in questa zona la pasta ha la possibilità maggiore di deformarsi. Per evitare eccessive tensioni della sfoglia all'ingresso dell'essiccatoio dovute all'alta temperatura presente, solitamente la fase incartamento avviene ad una temperatura di 80°C, viene fornita all'interno dell'essiccatoio una quantità di vapore pari all'80% di umidità relativa dell'aria. Nelle zone successive l'umidità presente nell'aria è dovuta alla sola evaporazione dell'acqua contenuta nella pasta.

In questa zona il prodotto viene riscaldato e vi è la maggior diminuzione di umidità nella sfoglia. Si passa infatti da un'umidità d'ingresso del 30% fino ad arrivare alla zona successiva dove l'umidità è del 19% in peso.

Nella seconda fase, cioè durante la fase essiccazione, grazie ad un'ulteriore diminuzione dell'umidità si vengono a creare dei gradienti di concentrazione d'acqua tra le zone periferiche della sfoglia e quelle più interne. Tali gradienti determinano differenze di volume tra zona e zona: le riduzioni di volume non avvengono linearmente, ma con velocità diverse tra superficie della pasta e zone interne. La superficie esterna della pasta tende a contrarsi velocemente, mentre il volume delle zone interne, per la lenta diffusione dell'acqua, si riduce molto meno.

Il risultato è che in essa si creano tensioni che possono rovinare il prodotto finale. Queste tensioni sono inevitabili e devono essere gestite adeguatamente mediante un corretto rapporto temperatura/umidità dell'aria.

La fase finale di raffreddamento ha lo scopo di stabilizzare il prodotto annullando i gradienti di umidità presenti nella sfoglia e di abbassare la temperatura del prodotto per consentire il confezionamento che avverrà successivamente. Un'ulteriore perdita di umidità risulta comunque inevitabile. Il processo di essiccazione deve far raggiungere alla pasta un'umidità inferiore al 12,5%, limite imposto dalla legge per garantire un'adequata conservazione del prodotto confezionato.

### 3.5 Condizioni di utilizzo dell'essiccatoio.

Vengono riportati i dati raccolti nelle varie zone e l'evoluzione dell'umidità nel percorso di essiccazione.

La fase di essiccazione è stata ulteriormente divisa in tre zone al fine di avere una più accurata conoscenza dei livelli di umidità che incontra la sfoglia.

Ad ogni zona corrisponde quindi un valore di umidità diverso.

Vengono riportate in Tabella 3.1 le condizioni di set-point dell'essiccatoio, nello specifico si riportano la temperatura e l'umidità relativa dell'aria, espressa in percentuale ponderale. Queste coincidono ovviamente con le condizioni alle quali sono state effettuate le prove.

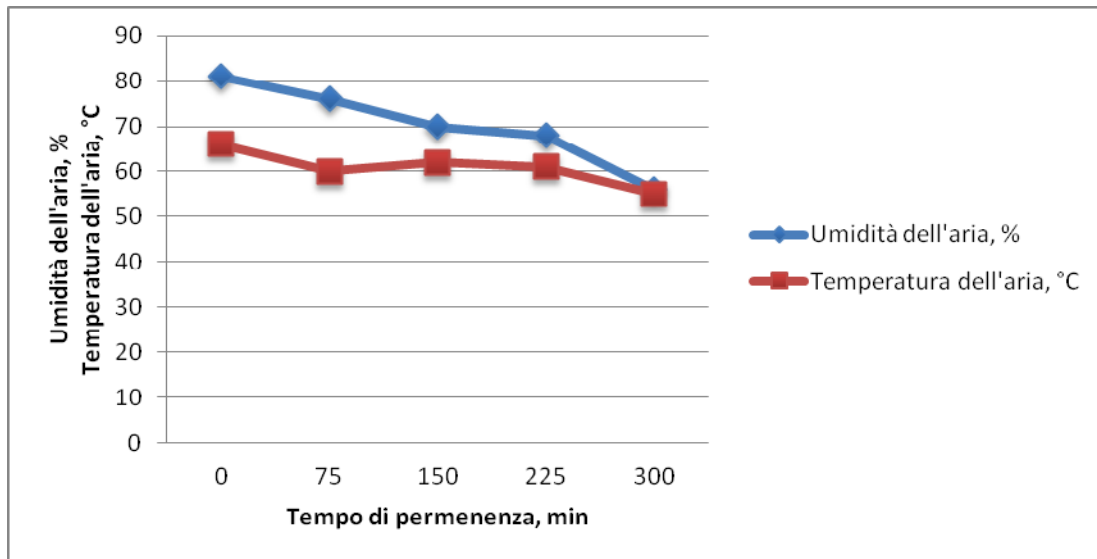
**Tabella 3.1:** Condizioni di set-point alle quali lavora l'essiccatoio.

Incartamento		Essiccazione						Raffreddamento	
		Zona A		Zona B		Zona C			
T, °C	H, %	T, °C	H, %	T, °C	H, %	T, °C	H, %	T, °C	H, %
66	81	60	76	62	70	61	68	55	56

Come si è già detto, la sfoglia percorre sia in altezza che in lunghezza l'essiccatoio.

Il tempo necessario affinché una determinata porzione di sfoglia attraversi l'essiccatoio è fissato dalla velocità di caricamento dei telai. Nelle condizioni alle quali si è condotto lo studio si ha che questo tempo di percorrenza corrisponde a 300 minuti.

In Figura 3.1 si riportano le condizioni fissate di umidità e temperatura dell'ambiente dell'essiccatoio in esame.



**Figura 3.1:** *Umidità e temperatura dell'ambiente di essiccazione che incontra il prodotto durante il processo.*

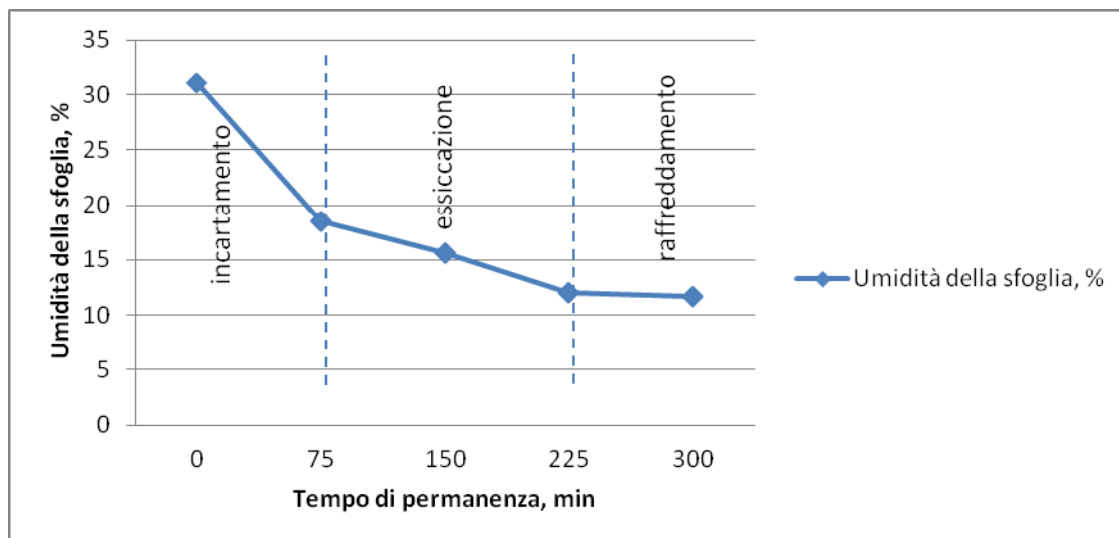
Si è quindi proceduto ad analizzare in che modo la sfoglia varia il suo contenuto in acqua; per fare ciò si sono raccolti dei campioni in stadi diversi del processo: prima che la sfoglia entri nell'essiccatoio, durante l'essiccazione stessa e alla fine di questa, appena prima del confezionamento.

In Tabella 3.2 sono tabulati i valori di umidità che contiene la sfoglia ottenuti ai rispettivi tempi di permanenza all'interno dell'essiccatoio. Ad ogni zona è assegnato un punto di prelievo.

**Tabella 3.2:** *Valori di umidità contenuta nella sfoglia al procedere all'interno dell'essiccatoio.*

Punto di prelievo	Tempo di permanenza, min	Umidità della sfoglia, %
1	0	31,107
2	75	18,538
3	150	15,567
4	225	12,014
5	300	11,670

Per rendere più chiara la variazione viene graficata in Figura 3.2 l'andamento dell'umidità contenuta nella sfoglia nelle varie fasi. L'umidità della sfoglia viene espressa in percentuali di peso d'acqua rispetto al peso della sfoglia umida.



**Figura 3.2:** Calo di umidità della sfoglia nel processo di essiccazione.

Il grafico conferma che nella prima fase di essiccazione, cioè quella di incartamento, si ha una deumidificazione spinta, si ottiene infatti quasi una dimezzamento dell'umidità presente nel prodotto passando da un valore di 31% a 19%. Nella fase di essiccazione, nella quale la sfoglia transita per un intervallo di tempo maggiore, la velocità di essiccazione risulta costante, con una diminuzione lineare della presenza d'acqua. Si arriva infine al processo di raffreddamento dove la curva di essiccazione risulta asintotica verso valori compresi tra 11 e 13 % di umidità relativa.

### 3.6 Realizzazione del progetto.

La conoscenza e la conseguente gestione consapevole dell'essiccazione nel processo produttivo risultano di importanza centrale poiché da una corretta essiccazione dipendono l'aspetto visivo della pasta, le sue caratteristiche fisiche e la sua conservazione dopo il confezionamento.

Lo scopo del progetto è quello di scoprire di che entità siano le variazioni di umidità che subisce la sfoglia come conseguenza di variazioni dei parametri determinanti dell'essiccazione; in particolare si vuole scoprire che effetti può avere l'abbassamento di temperatura nelle diverse zone dell'essiccatoio.

Inizialmente si è provveduto ad effettuare una riduzione di 3°C della sola zona C della fase di essiccazione, si è quindi passati da una temperatura di 61°C a 58°C.



La regolazione della temperatura all'interno dell'impianto viene regolata e mantenuta da uno scambiatore di calore alimentato da acqua surriscaldata. Essendo il processo in continuo si deve attendere che l'essiccatoio raggiunga la nuova temperatura di set-point.

Il tempo di deriva, cioè quello necessario a raggiungere la temperatura di set-point, è stato di 84 minuti.

Dal momento in cui la temperatura nell'impianto ha eguagliato quella di set-point si può considerare il sistema stazionario. Per fare in modo che il campione che verrà prelevato in uscita sia stato essiccato interamente nelle nuove condizioni si deve attendere il tempo necessario affinché la sfoglia percorra l'essiccatoio quando questo si trova in condizioni di temperatura e umidità stazionarie.

In altre parole, si provvede al campionamento di pasta in uscita dopo 150 minuti dal momento in cui l'essiccatoio si trova a regime. Questo è infatti il tempo che impiegano i telai a percorrere la zona 3 dell'essiccazione e la zona di raffreddamento. Si è inoltre prelevato un campione a metà percorso della zona di raffreddamento; in questo caso il tempo di attesa risulta essere minore, nello specifico 115 minuti.

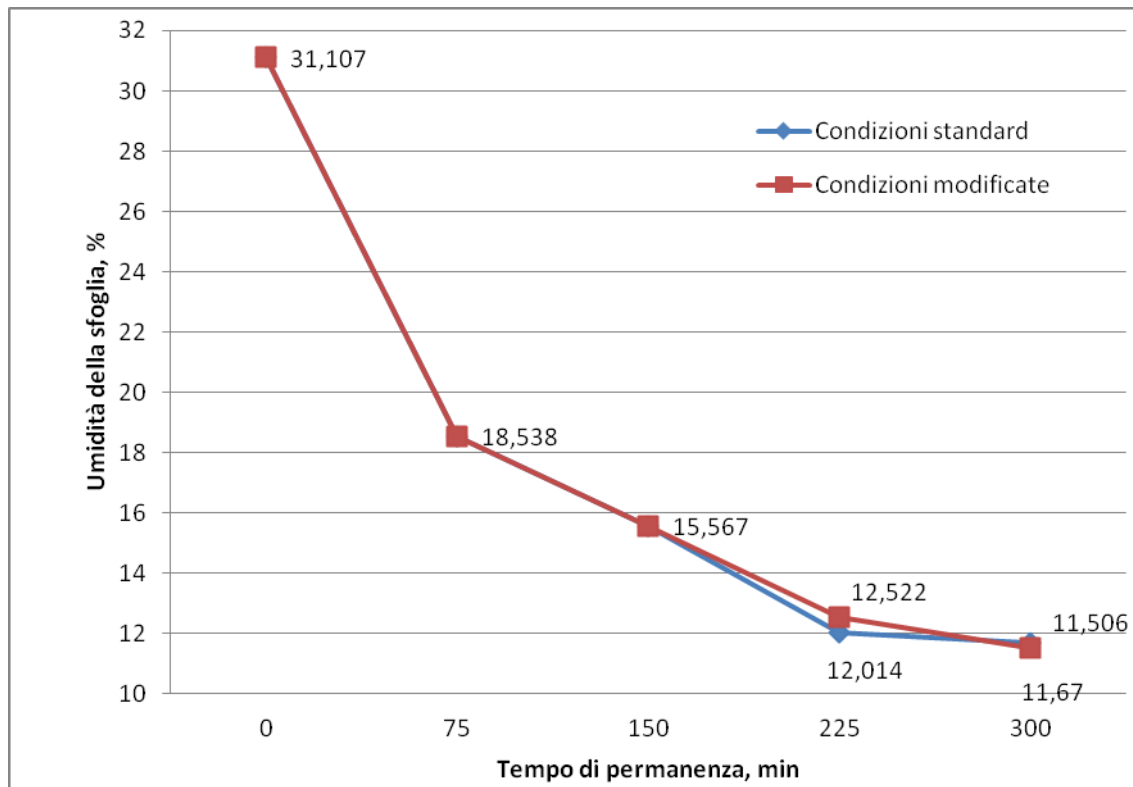
Rispettati questi accorgimenti si è provveduto al prelievo di 5 campioni. Sono stati analizzati solo campioni di pasta che hanno subito la variazione delle condizioni di essiccazione.

Avendo modificato i set-point dell'ultima fase di essiccazione si sono analizzati solo i campioni provenienti da quest'ultima fase e quelli in uscita dall'essiccatoio. In Tabella 3.3 vengono mostrate le misurazioni effettuate per ogni prelievo ed effettuata la media aritmetica dei valori ottenuti. Risulta quindi che le umidità relative sono:

**Tabella 3.3:** *Umidità della sfoglia nella zona C dell'essiccamento e nella zona di raffreddamento.*

Campione	Punto 4	Punto 5
1	12,49	11,412
2	12,585	11,453
3	12,576	11,542
4	12,456	11,498
5	12,505	11,628
<b>Media</b>	<b>12,522</b>	<b>11,506</b>
<b>Deviazione standard</b>	0,0560	0,0834

Nel seguente grafico, riportato in Figura 3.3, si evidenziano le variazioni che ha subito il prodotto come conseguenza delle cambiamenti imposti.



**Figura 3.3:** Umidità della sfoglia in condizioni standard e in condizioni di set-point modificate solamente per la zona C.

Come denota il grafico, si ha un leggero aumento di umidità della pasta nella zona dove è stata effettuata la modifica del parametro; questa variazione viene però del tutto recuperata nella fase successiva di raffreddamento le cui condizioni si possono considerare non influenzate dalla variazione delle condizioni della zona precedente.

Concludendo, la variazione effettuata non comporta alcun effetto al valore finale di umidità del prodotto.

La variazione di una sola fase non comporta quindi nessuna variazione sensibile sull'umidità del prodotto finale, poiché la sfoglia recupera nelle fasi successive la variazione conquistata. Per poter ottenere variazioni stimabili di umidità del prodotto si è pensato di abbassare di un grado centigrado tutte e quattro le temperature di set dell'impianto.

In Tabella 3.4 sono riportate le condizioni di set-point in cui lavora l'essiccatoio dopo la variazione imposta.

**Tabella 3.4:** *Condizioni di set-point dell'essiccatoio dopo aver abbassato di un grado centigrado ogni fase.*

Incartamento		Essiccazione						Raffreddamento	
		Zona A		Zona B		Zona C			
T, °C	H, %	T, °C	H, %	T, °C	H, %	T, °C	H, %	T, °C	H, %
65	81	59	76	61	70	60	68	54	56

Dal prelievo in uscita dall'essiccatore dopo 5 ore, ovvero il tempo di permanenza della sfoglia all'interno dell'essiccatoio, si ottengono le seguenti umidità relative (Tabella 3.5):

**Tabella 3.5:** *Umidità della sfoglia all'uscita dall'essiccatoio che lavora nelle condizioni di Tabella 3.4.*

Campione	Punto 5
1	11,714
2	11,559
3	11,888
4	11,998
5	11,782
<b>Media</b>	<b>11,788</b>
<b>Deviazione standard</b>	0,1673

Come atteso si evidenzia quindi un leggero aumento dell'umidità finale del prodotto, che in condizioni standard aveva una media di 11,670 %.

A questo punto si è provveduto ad abbassare ulteriormente le temperature di ogni fase di 1 °C. Si riportano in Tabella 3.6 le condizioni di set-point impostate per effettuare le nuove misurazioni.

**Tabella 3.6:** Condizioni di set-point dell'essiccatoio dopo aver abbassato di due gradi centigradi ogni fase.

Incartamento		Essiccazione						Raffreddamento	
		Zona A		Zona B		Zona C			
T, °C	H, %	T, °C	H, %	T, °C	H, %	T, °C	H, %	T, °C	H, %
64	81	58	76	60	70	59	68	53	56

Dal momento in cui temperature di ogni zona hanno raggiunto le nuove temperature di set-point, si è atteso che trascorresse il tempo necessario affinché la sfoglia subisse l'intero processo di essiccazione alle nuove condizioni.

Dai prelievi effettuati in uscita dalla linea, si sono ottenuti i seguenti valori (Tabella 3.7):

**Tabella 3.7:** Umidità della sfoglia all'uscita dall'essiccatoio che lavora nelle condizioni di Tabella 3.6.

Campione	Punto 5
1	11,899
2	11,788
3	11,869
4	11,972
5	11,786
<b>Media</b>	11,863
<b>Deviazione standard</b>	0,0786

Si è ottenuto un ulteriore aumento dell'umidità, con queste condizioni a parità di diminuzione effettuata, si ottiene un minore scostamento di umidità rispetto alla prova precedente.

Per rilevare un innalzamento aggiuntivo dell'umidità in uscita ci si è spinti ad abbassare l'intera linea di essiccazione di un ulteriore grado centigrado, arrivando ad essiccare la sfoglia di tre gradi centigradi al di sotto delle condizioni standard.

In Tabella 3.8 si riportano le condizioni a cui lavora l'essiccatoio dopo l'ulteriore modifica apportata.

**Tabella 3.8:** *Condizioni di set-point dell'essiccatoio dopo aver abbassato di tre gradi centigradi ogni fase.*

Incartamento		Essiccazione						Raffreddamento	
		Zona A		Zona B		Zona C			
T, °C	H, %	T, °C	H, %	T, °C	H, %	T, °C	H, %	T, °C	H, %
63	81	57	76	59	70	58	68	52	56

In questo caso si è scelto di effettuare l'analisi su 10 prelievi poiché aspettandosi un'umidità sensibilmente maggiore, si è preferito avere maggiori misurazioni al fine di ottenere un risultato più preciso.

In Tabella 3.9 si riportano i risultati ottenuti.

Con questa variazione si ha il sostanziale aumento di umidità al quale mirava il progetto, nello specifico la variazione risulta di 0,345 punti percentuali.

**Tabella 3.9:** *Umidità della sfoglia all'uscita dall'essiccatoio che lavora nelle condizioni di Tabella 8.*

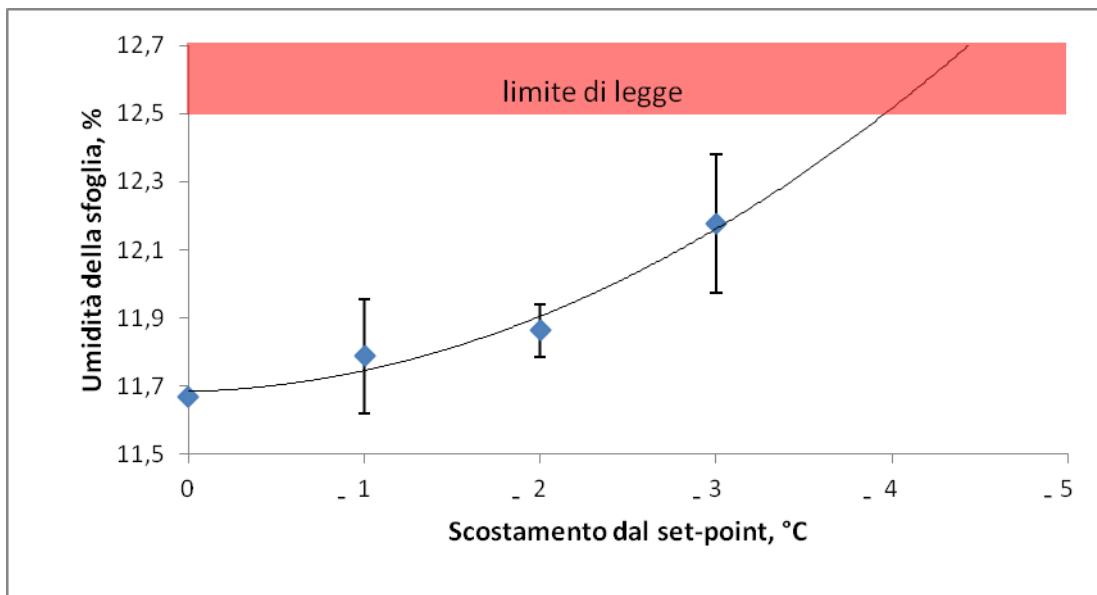
Campione	Punto 5
1	12,343
2	12,206
3	11,944
4	12,386
5	11,928
6	12,440
7	12,024
8	11,923
9	12,324
10	12,239
<b>Media</b>	12,176
<b>Deviazione standard</b>	0,2030

### 3.7 Riepilogo dei valori ricavati.

Al fine di avere un'idea sulla correlazione tra abbassamento di temperatura del processo di essiccazione e le variazioni di umidità che ne derivano, si riporta il grafico di Figura 3.4, dove si ha in ascissa le variazioni negative di temperatura rispetto alle

condizioni standard di lavoro e in ordinata le umidità in uscita dall'essiccatoio per ogni variazione. Dall'analisi di questo emerge che variazioni di temperatura inferiori ai tre gradi centigradi non comportano un sostanziale aumento di umidità finale della pasta. Si otterranno quindi sensibili variazioni di risultato solo nel momento in cui le temperature di essiccazione saranno minori di almeno tre gradi centigradi da quelle di set-point.

Questo dato è utile in quanto ci fa conoscere il margine di errore entro il quale l'essiccatoio adempie in sicurezza al suo compito.



**Figura 3.4:** *Variazione dell'umidità conseguente alla diminuzione della temperatura di set-point nell'essiccatoio.*

Ricordiamo infatti che per legge il prodotto finito deve avere un'umidità inferiore a 12,5%.

Per diminuzioni ancora più spinte della temperatura si rischia, anzi, è praticamente certo che il prodotto finito non rispetti più tale limite, di conseguenza non è stato possibile effettuare ulteriori rilievi su temperature di processo minori. La tendenza risulta comunque palese, e dalla curva si può estrapolare che un eventuale abbassamento comporti un aumento ancora più forte dell'umidità della sfoglia in uscita dall'essiccatoio.

Concludendo si può immaginare che si abbia un aumento molto forte dell'umidità del prodotto finito solo con una diminuzione di almeno 3 gradi centigradi rispetto alle condizioni di regime nel quale lavora l'essiccatoio, mentre le variazioni minori di

temperatura hanno effetti ridotti, quasi trascurabili sulle proprietà fisiche del prodotto finito.

# Capitolo 4

## Relazione tecnica sulla valutazione del rischio di fughe di ammoniaca

La tirocinante ha affrontato diverse problematiche nel corso del suo stage, tutte comunque relative al quotidiano lavoro che deve sostenere un ufficio tecnico di una piccola azienda; tra queste si riporta una relazione da lei redatta sulla valutazione di rischio di un rilascio di ammoniaca dovuto a una eventuale perdita del gruppo valvole posizionato sul tetto dello stabilimento.

### 4.1 Descrizione del problema da analizzare

L'Industria Alimentare Ferraro ha installato ed intende mettere in esercizio un impianto frigorifero ad ammoniaca nel proprio stabilimento di Mussolente.

A seguito della domanda di autorizzazione all'uso dei gas tossici, la commissione competente ha imposto la seguente condizione:

*... venga previsto un sistema di abbattimento di eventuali fughe di ammoniaca sul tetto dell'edificio in corrispondenza delle diramazioni delle tubazioni ovvero sia dimostrato che i quantitativi in gioco in caso di perdite sarebbero di entità modesta e comunque non pregiudizievole della popolazione.*

Allo scopo di rispondere a tale richiesta la ditta GEA Technofrigo, produttrice dell'impianto, ha inviato una relazione tecnica, a firma dell'ing. C. Stella, all'Azienda Alimentare Ferraro, che calcola la quantità di ammoniaca che verrebbe emessa in caso di fuga.

Con quest'analisi si vuole invece calcolare fino a quale distanza, in caso di fuga l'ammoniaca verrebbe percepita, tenendo conto della soglia olfattiva relativa alla sostanza considerata.

Le tubazioni di distribuzione dell'ammonica liquida e gassosa sono per lo più in costruzione completamente saldata in modo tale da poter escludere, a seguito del



collaudo in pressione, possibili perdite. Ciò non è stato possibile in corrispondenza di alcune apparecchiature e valvole di regolazione.

I punti di possibile perdita sono stati in ogni caso collocati all'esterno e sono individuabili nelle seguenti apparecchiature:

- centrale frigorifera;
- condensatore evaporativo;
- valvole di regolazione delle utenze.

In tutti e tre i casi l'ammoniaca all'interno delle tubazioni è presente sia in fase gas che in fase liquida.

La centrale frigorifera è dotata di propri sistemi di sicurezza e abbattimento degli sfiati di ammoniaca. In particolare essa è dotata di un impianto sprinkler e di un abbattitore di tipo scrubber in grado di assorbire, mediante getti d'acqua, l'ammoniaca presente nell'aria. L'acqua viene quindi raccolta in una vasca tenuta costantemente vuota allo scopo di raccogliere l'acqua contaminata.

Le fughe dalle tubazioni del condensatore evaporativo e dalle valvole di regolazione delle utenze sono invece unicamente rilevate da due sensori di ammoniaca installati allo scopo e collegate all'impianto di allarme.

## **4.2 Calcolo del quantitativo emesso dalla fuga accidentale.**

L'accidentale fuga di ammoniaca è ammissibile solo sulla parte del circuito situato sul tetto dello stabilimento e in prossimità del condensatore evaporativo, dove sono concentrate le valvole di regolazione dell'impianto, essendo saldato il resto delle tubazioni interne al fabbricato.

La possibile perdita può avvenire per un guasto delle guarnizioni delle flange delle valvole solenoidi delle linee di alimentazione dell'ammoniaca liquida. Si considera un foro di 2,5 mm<sup>2</sup> di sezione, come suggerito dalle norme CEI.

La portata di emissione si calcola con la formula (4.1)

$$Q = CA \sqrt{2\rho_{NH_3}(P - P_a)} \quad (4.1)$$

Dove  $C$  è il coefficiente di efflusso il cui valore risulta  $C=0.8$ ,  $A$  è l'area del foro che è assunta essere pari a  $2,5 \text{ mm}^2$ ,  $P$  è la pressione assoluta nel sistema ricavata considerando la pressione imposta dalla pompa al liquido e la pressione di saturazione relativa al liquido stesso, la cui somma risulta essere  $3,2 \text{ bar}$ , e infine  $P_a$  è la pressione atmosferica assunta  $P_a=1 \text{ bar}$ .

Si ottiene una portata di  $1,1 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$ . Ipotizzando che il tempo necessario ad eliminare la fuga di ammoniaca (tempo di intervento) sia pari a un'ora, risulta che il quantitativo massivo del fluido che può fuoriuscire è pari a  $4 \text{ Kg}$ .

Il tempo di intervento è certamente sovrastimato considerando che lo stabilimento è presidiato 24 ore su 24, fatti salvi alcuni giorni all'anno, e dotato di impianto di allarme collegato a combinatore telefonico.

### **4.3 Studio sul possibile inquinamento olfattivo dovuto alla perdita.**

Per valutare gli effetti che la fuga può avere sull'ambiente circostante è stato utilizzato il programma ALOHA.

Questo programma è utilizzato per valutare il rilascio fortuito di vapori inquinanti; esso si basa sul modello di dispersione gaussiano.

ALOHA calcola le aree di danno coinvolte dalla nube tossica esaminando vari fattori:

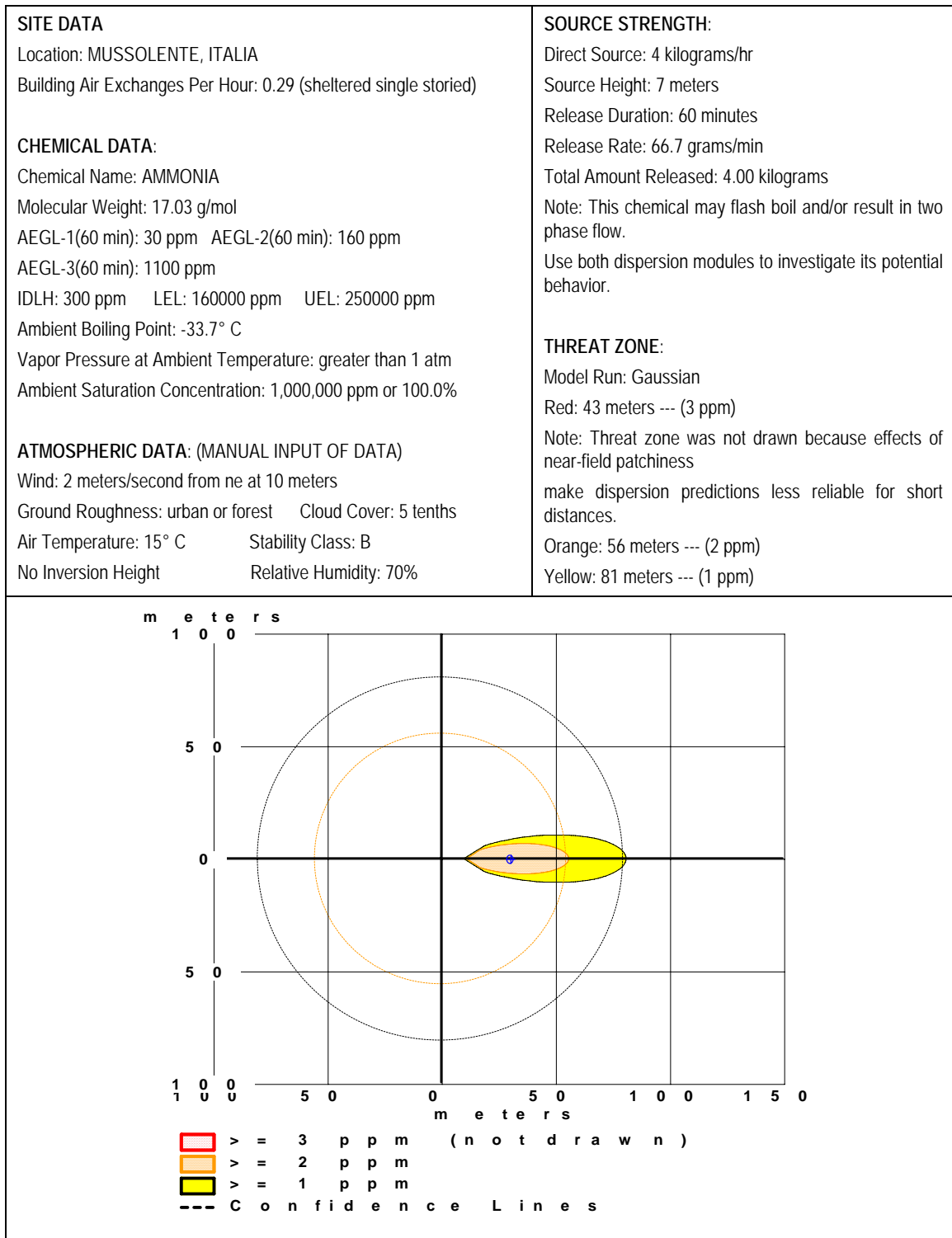
1. caratteristiche chimico fisiche dell'inquinante;
2. tipologia degli edifici e del terreno circostante;
3. condizioni meteo.

Il limite inferiore di olfattività dell'ammoniaca varia dai  $5$  ai  $25 \text{ ppm}$ , a seconda della sensibilità personale. In realtà la maggior parte delle persone percepisce i  $25 \text{ ppm}$ , mentre solo alcune persone percepiscono fino a  $5 \text{ ppm}$ .

Analizzando varie situazioni atmosferiche si è notato che il vento e la stabilità atmosferica hanno la maggior influenza sulla dispersione della nube tossica: è stata quindi effettuata una breve ricerca sulla storia climatica della zona ed è risultato che il vento varia da valori minimi di  $2 \text{ m/s}$  fino a raggiungere i  $16 \text{ m/s}$ .

Vengono ora riportati alcuni grafici, ricavati applicando il programma ALOHA preceduti dall'elenco delle condizioni imposte per ognuno di essi.

Nella Figura 4.1 è riportato il grafico prodotto applicando il programma ALOHA considerando una situazione di alta stabilità atmosferica con venti di 2 m/s.



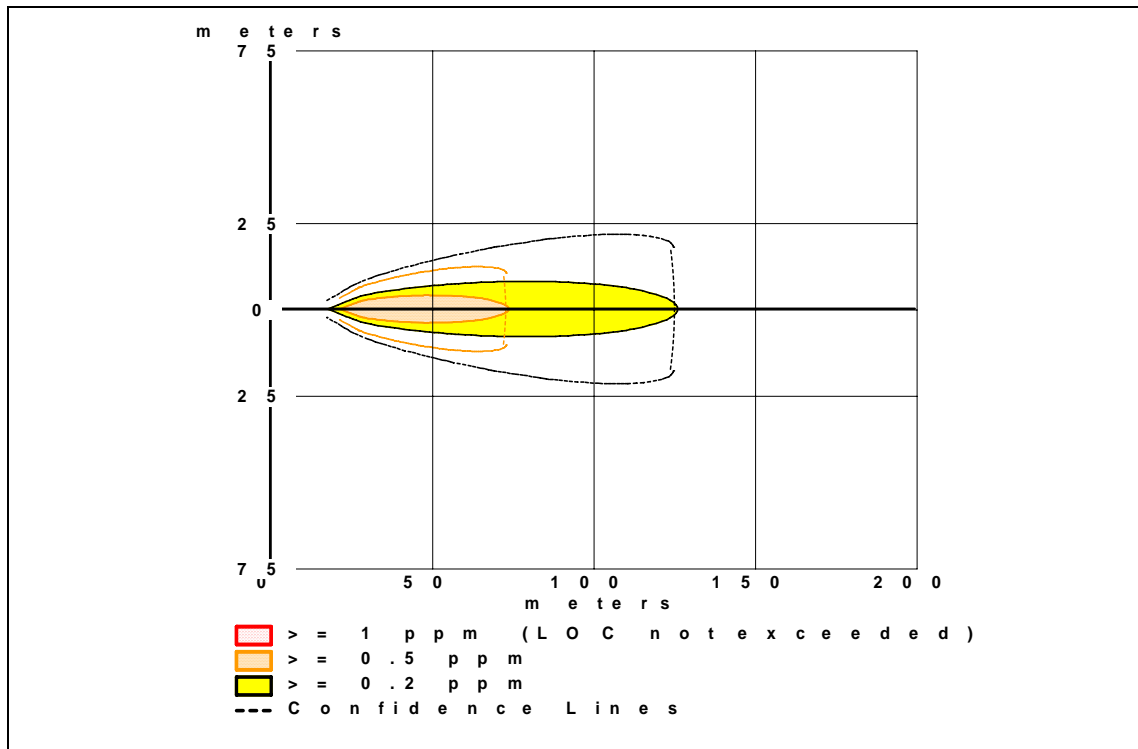
**Figura 4.1:** Calcolo effettuato con ALOHA in condizioni di alta stabilità atmosferica e velocità del vento di 2 m/s.

Come si evince dal grafico, in queste condizioni climatiche, il limite di olfattività viene raggiunto ad una distanza di molto inferiore a 70 metri, distanza alla quale sorge la più vicina abitazione dal possibile luogo di fuoriuscita. Il grafico mostra che a 81 metri si raggiungono gli 1 ppm e a 56 metri la concentrazione di ammoniaca raggiunge i 2 ppm. Introdotte altre soglie limite, il programma ha calcolato che a 43 metri si raggiungono i 3 ppm, mentre concentrazioni maggiori a 3.5 ppm sono racchiuse in un'area di raggio inferiore ai 39 metri.

Viene ora proposto in Figura 4.2 il caso in cui si abbia una media stabilità atmosferica con vento di 15 m/s.

In questa situazione gli 1 ppm non vengono riportati sul grafico poiché sono raggiunti a distanza troppo ravvicinata alla sorgente dell'inquinante. Pur essendo questo un limite del programma si capisce bene che la concentrazione a media distanza dal luogo di fuoriuscita è trascurabile.

<p><b>SITE DATA</b>            Location: MUSSOLENTE, ITALIA            Building Air Exchanges Per Hour: 1.29 (sheltered single storied)</p> <p><b>CHEMICAL DATA:</b>            Chemical Name: AMMONIA            Molecular Weight: 17.03 g/mol            AEGL-1(60 min): 30 ppm AEGL-2(60 min): 160 ppm            AEGL-3(60 min): 1100 ppm            IDLH: 300 ppm LEL: 160000 ppm UEL: 250000 ppm            Ambient Boiling Point: -33.7° C            Vapor Pressure at Ambient Temperature: greater than 1 atm            Ambient Saturation Concentration: 1,000,000 ppm or 100.0%</p> <p><b>ATMOSPHERIC DATA: (MANUAL INPUT OF DATA)</b>            Wind: 15 meters/second from ne at 10 meters            Ground Roughness: urban or forest Cloud Cover: 5 tenths            Air Temperature: 15° C Stability Class: D            No Inversion Height Relative Humidity: 70%</p>	<p><b>SOURCE STRENGTH:</b>            Direct Source: 4 kilograms/hr            Source Height: 7 meters            Release Duration: 60 minutes            Release Rate: 66.7 grams/min            Total Amount Released: 4.00 kilograms            Note: This chemical may flash boil and/or result in two phase flow.            Use both dispersion modules to investigate its potential behavior.</p> <p><b>THREAT ZONE:</b>            Model Run: Gaussian            Red: LOC is not exceeded 43 meters --- (1 ppm)            Note: Threat zone was not drawn because effects of near-field patchiness make dispersion predictions less reliable for short distances.            Orange: 74 meters --- (0,5 ppm)            Yellow: 126 meters --- (0,2 ppm)</p>
---	--



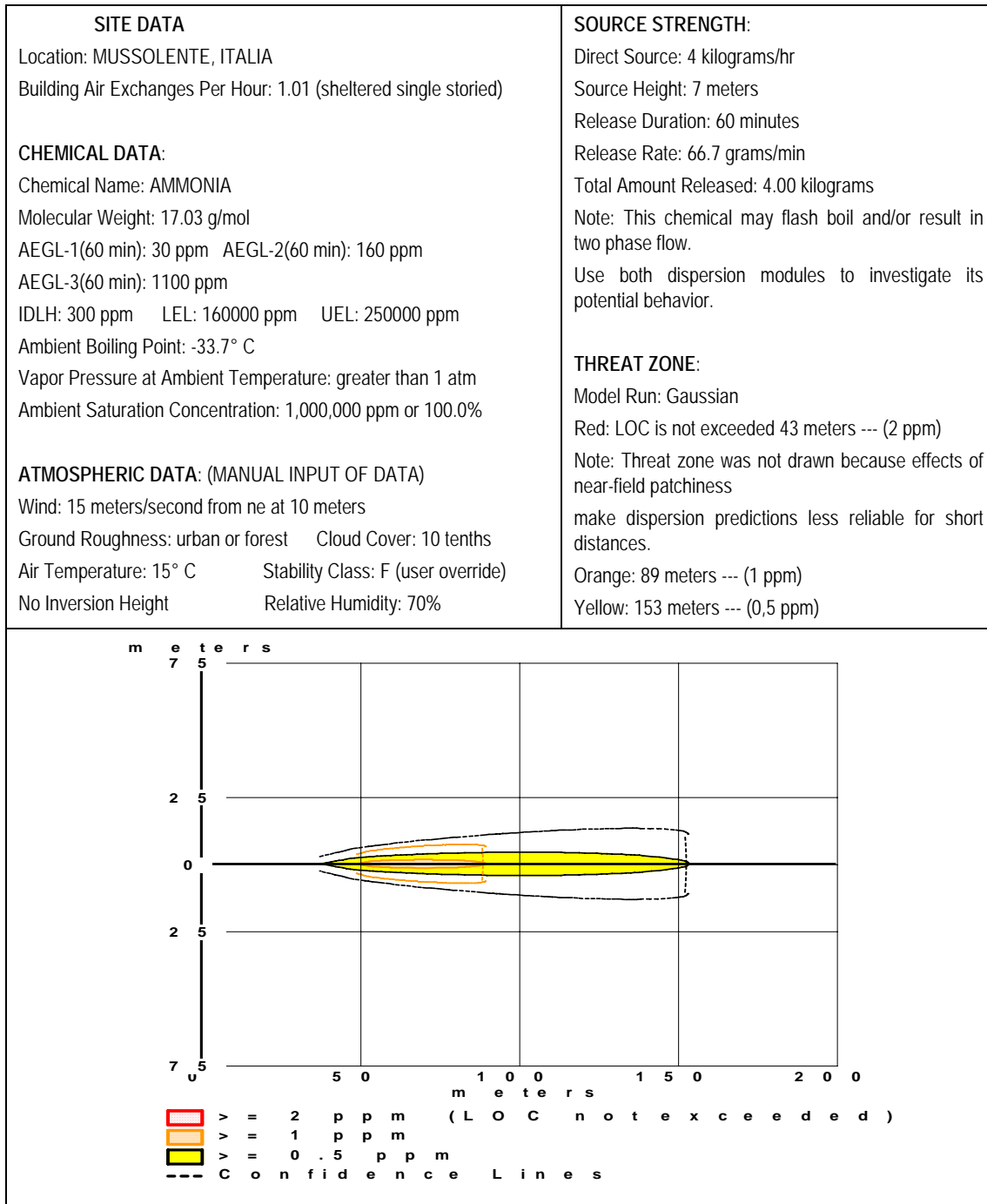
**Figura 4.2:** Calcolo effettuato con ALOHA in condizioni di media stabilità atmosferica e velocità del vento di 15 m/s.

In ogni caso gli 0.5 ppm toccano un'area di 74 metri di raggio, allo stesso modo gli 0.2 ppm raggiungono un raggio di 126 metri.

Si riporta infine in Figura 4.3 il calcolo effettuato dal programma ALOHA nel caso di massima instabilità atmosferica e vento di 15 m/s.

A queste condizioni si verifica la stessa circostanza del grafico precedente, ad ogni modo si rilevano 1 ppm a 89 metri di raggio, e gli 0.5 ppm a 153 metri.

Compiendo altre misurazioni a temperature diverse si è notato che all'aumentare di quest'ultima vi è un aumento del raggio di dispersione della nube tossica; la variazione è trascurabile con venti medio-alti, ma considerando venti minimi (2m/s) può comportare un allargamento dell'area di danno fino al 25%.



**Figura 4.3** : Calcolo effettuato con ALOHA in condizioni di massima instabilità atmosferica e velocità del vento di 15 m/s.

### 4.4 Studio sull'eventuale possibilità d'incendio dovuto alla fuga di ammoniaca.

ALOHA ha inoltre la possibilità di calcolare anche le aree entro le quali, in presenza di un innesco, è possibile che si raggiunga l'intervallo di infiammabilità aria-ammoniaca, corrispondente al 15-25% in volume.

Il programma evidenzia il raggiungimento del limite superiore di infiammabilità, di quello inferiore e di un livello che corrisponde a un decimo del limite superiore. Le condizioni atmosferiche sono di media stabilità e con venti di 2 m/s.

In Figura 4.4 sono riportati i risultati forniti dal programma.

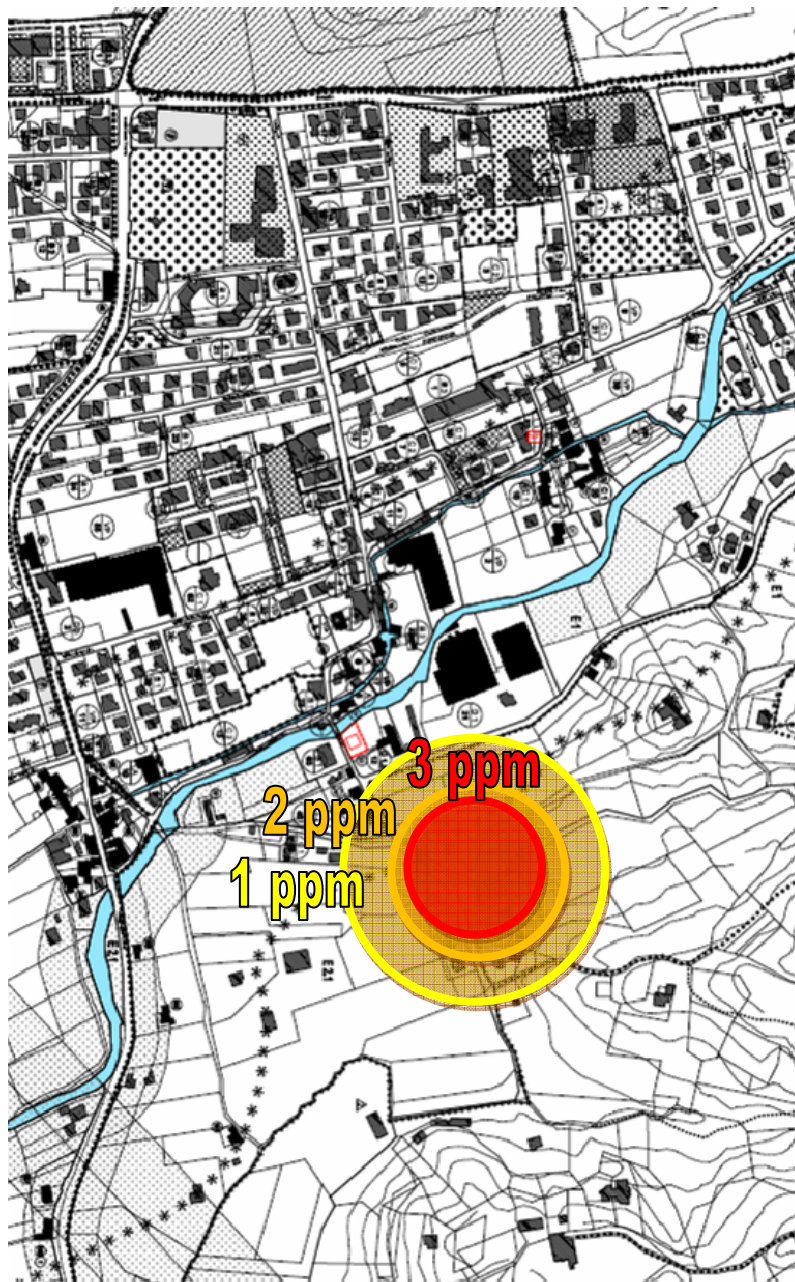
<p><b>SITE DATA</b>                  Location: MUSSOLENTE, ITALIA                  Building Air Exchanges Per Hour: 0,29 (sheltered single storied)</p> <p><b>CHEMICAL DATA:</b>                  Chemical Name: AMMONIA                  Molecular Weight: 17.03 g/mol                  AEGL-1(60 min): 30 ppm AEGL-2(60 min): 160 ppm                  AEGL-3(60 min): 1100 ppm                  IDLH: 300 ppm LEL: 160000 ppm UEL: 250000 ppm                  Ambient Boiling Point: -33.7°C                  Vapor Pressure at Ambient Temperature: greater than 1 atm                  Ambient Saturation Concentration: 1,000,000 ppm or 100.0%</p> <p><b>ATMOSPHERIC DATA: (MANUAL INPUT OF DATA)</b>                  Wind: 2 meters/second from ne at 10 meters                  Ground Roughness: urban or forest Cloud Cover: 5 tenths                  Air Temperature: 15° C Stability Class: B                  No Inversion Height Relative Humidity: 70%</p>	<p><b>SOURCE STRENGTH:</b>                  Direct Source: 4 kilograms/hr                  Source Height: 7 meters                  Release Duration: 60 minutes                  Release Rate: 66.7 grams/min                  Total Amount Released: 4.00 kilograms                  Note: This chemical may flash boil and/or result in two phase flow.                  Use both dispersion modules to investigate its potential behavior.</p> <p><b>THREAT ZONE:</b>                  Threat Modeled: Flammable Area of Vapor Cloud                  Model Run: Gaussian                  Red : less than 10 meters (10.9 yards) --- (160000 ppm = LEL)                  Note: Threat zone was not drawn because effects of near-field patchiness make dispersion predictions less reliable for short distances.                  Orange: less than 10 meters(10.9 yards) --- (96,000 ppm = 60% LEL = Flame Pockets)                  Note: Threat zone was not drawn because effects of near-field patchiness make dispersion predictions less reliable for short distances.                  Yellow: less than 10 meters(10.9 yards) --- (16,000 ppm = 10% LEL)                  Note: Threat zone was not drawn because effects of near-field patchiness make dispersion predictions less reliable for short distances.</p>
---	---

**Figura 4.4:** Calcolo effettuato con il programma ALOHA sui limiti di infiammabilità con media stabilità atmosferica e venti di 2 m/s.

Dal calcolo risulta che l'intervallo di infiammabilità della miscela ammoniacca-aria è limitato ad un'area avente un raggio sicuramente inferiore a 10 metri, questo comporta che l'eventuale esplosione causata da un innesco nello stabilimento rimanga confinata nello stabilimento stesso.

L'area interessata dal pericolo di incendio rimane la stessa anche studiando il fenomeno con un vento di 15 m/s.

In Figura 4.5 viene riportata la carta geografica della località nella quale si trova lo stabilimento e l'area di impatto corrispondente al calcolo presentato in Figura 4.1.



**Figura 4.5:** Rappresentazione grafica dell'area di impatto nel caso analizzato in Figura 4.1 .



#### **4.5 Conclusioni dello studio effettuato.**

In base alle simulazioni effettuate, si può ritenere che una eventuale perdita, da uno dei due punti individuati come gli unici da cui possa essere emessa ammoniaca in ambiente senza che vi sia uno specifico abbattimento, non sia pregiudizievole per la popolazione in quanto è estremamente improbabile che venga raggiunta la soglia olfattiva e comunque non si raggiungono mai livelli di pericolo per la salute e l'incendio.

In vicinanza di tali punti sono comunque messi a disposizione mezzi antincendio ad acqua (idranti) collegati alla rete aziendale in modo tale che, qualora non sia possibile ridurre rapidamente la perdita, sia quantomeno possibile abbattere con acqua la fuga di ammoniaca.

# Capitolo 5

## Conclusioni

Il lavoro svolto è stato sviluppato su due argomenti: le variazioni di temperatura in un essiccatoio di pasta secca e lo studio sulle possibili conseguenze dovute a una fuga di ammoniaca dal gruppo valvole dell'impianto frigorifero installato all'interno dell'azienda.

Per quanto riguarda la prima problematica si è giunti alla conclusione che variazioni di temperatura inferiori ai tre gradi centigradi non comportano un sostanziale aumento di umidità finale della pasta. Si otterranno quindi sensibili variazioni di risultato solo nel momento in cui le temperature di essiccazione saranno minori di almeno tre gradi centigradi da quelle di set-point. Di conseguenza, nel caso avessimo un'erronea taratura delle termoresistenze che regolano la temperatura alla quale si svolge il processo, l'errore entro il quale vengono comunque rispettati i limiti di legge risulta essere di 3 gradi centigradi.

Passando al secondo argomento, dallo studio effettuato sulle conseguenze di un'eventuale perdita di ammoniaca dall'impianto frigorifero dell'azienda, emerge che l'impianto in questione risulta non costituire un rischio per la salute degli abitanti delle zone limitrofe. Infatti, considerando condizioni meteorologiche che porterebbero ad una maggiore entità del danno, cioè con venti minimi, si ha che viene raggiunto il limite minimo della soglia olfattiva a poche decine di metri dal punto di perdita. Oltre questa distanza le concentrazioni di ammoniaca sono molto inferiori ai valori minimi necessari perché questa venga percepita dalla popolazione. Per quanto riguarda il rischio di incendio, questo risulta essere minimo e, ad ogni modo, confinato all'interno della proprietà dell'azienda.





# Bibliografia

- Dennis R. Heldman, Daryl B. Lund, *Handbook of Food Engineering, Second Edition*, 2007, CRC PRESS
- James G. Brennan, *Food Processing Handbook*, 2006, WILEY-VCH Verlag & Co.
- D. A. Burns, E. W. Ciurczak, *Handbook of Near Infrared Analysis, Second Edition*, 2001, Markel Dekker Inc.
- P. Forzatti, L. Lietti, *Strumentazione Industriale Chimica*, 2001, CUSL
- <http://www.politicheagricole.it/SicurezzaAlimentare/default.htm>
- Appunti personali