

ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI BOLOGNA  
SEDE DI CESENA FACOLTÀ DI AGRARIA

---

*CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN SCIENZE E  
TECNOLOGIE ALIMENTARI*

Titolo della tesi:

**SVILUPPO DI UN MODELLO MATEMATICO  
PER LO STUDIO DELLE CONDIZIONI DI  
CONSERVAZIONE E STAGIONATURA DI UN  
PRODOTTO INSACCATO**

Tesi in:

Statistica ed elaborazione dei dati (c.i.)

Relatore:  
Prof. Ing. Angelo Fabbri

Presentata da:  
Silvia Mariani

Correlatore:  
Dott.ssa Chiara Cevoli

Sessione III

---

Anno accademico 2011/2012



# INDICE

|                   |   |
|-------------------|---|
| INTRODUZIONE..... | 5 |
|-------------------|---|

## *PARTE GENERALE*

### Capitolo 1. I PRODOTTI INSACCATI E FERMENTATI: IL SALAME

|                                       |    |
|---------------------------------------|----|
| 1.1 Definizione.....                  | 9  |
| 1.2 Tipologie di salami.....          | 10 |
| 1.3 Tecnologia di produzione.....     | 13 |
| 1.4 La conservabilità del salame..... | 19 |

### Capitolo 2. SIMULAZIONE NUMERICA

|  |    |
|--|----|
| 2.1 Introduzione.....                                      | 21 |
| 2.1 Modelli numerici.....                                  | 22 |
| 2.3 Creazione del modello numerico ad elementi finiti..... | 24 |
| 2.4 Simulazione per la soluzione di metodi inversi.....    | 28 |

|                                  |    |
|----------------------------------|----|
| Capitolo 3. STATO DELL'ARTE..... | 33 |
|----------------------------------|----|

## *PARTE SPERIMENTALE*

### Capitolo 4. MATERIALI E METODI

|  |    |
|--|----|
| 4.1 Organizzazione generale del lavoro.....  | 47 |
| 4.2 Determinazione del coefficiente di diffusione tramite metodo inverso.....              | 48 |
| 4.3 Modello numerico relativo alla fase di maturazione.....                                | 53 |
| 4.4 Modello numerico relativo alla fase di stagionatura<br>in confezioni impermeabili..... | 56 |

## Capitolo 5. RISULTATI

5.1 Determinazione del coefficiente di diffusione tramite metodo inverso.....61

5.2 Modello maturazione.....64

5.3 Modello conservazione.....70

CONCLUSIONI.....75

BIBLIOGRAFIA.....77

# INTRODUZIONE

La diffusione dell'acqua all'interno di un prodotto insaccato e stagionato a base di carne è sicuramente un aspetto di principale importanza per quanto riguarda la qualità del prodotto finale.

A tale proposito il seguente lavoro si propone di mettere a punto dei modelli numerici in grado di descrivere i fenomeni diffusivi che interessano l'interno di un salame, durante le fasi di maturazione e conservazione.

Il coefficiente di diffusione dell'acqua all'interno di un alimento è un parametro difficile da misurare con l'impiego esclusivo di metodi sperimentali laboratorio. In alternativa ai metodi diretti, possono essere utilizzati metodi inversi che combinano valori determinati sperimentalmente e provenienti da un modello numerico. A tale proposito, la prima parte del lavoro riguarda la messa a punto di un metodo inverso per la misura dei coefficienti diffusivi, basato sulla comparazione tra valori di concentrazione di acqua nel salame determinati sperimentalmente (in condizioni che rendono particolarmente semplice la misura) e numericamente.

Successivamente è stato realizzato un modello, relativo alla fase di maturazione di un insaccato tipo salame, in grado di descrivere sia i fenomeni diffusivi che avvengono all'interno del salame che i fenomeni di scambio che coinvolgono la superficie dell'insaccato e l'ambiente.

Successivamente alla maturazione, i salami vengono conservati in confezioni impermeabili, di conseguenza è stato realizzato un ulteriore modello in grado di descrivere sia i fenomeni diffusivi che si osservano all'interno del salame, sia i fenomeni di evaporazione e condensazione tra la superficie del salame e l'aria presente nella confezione. Tali fenomeni sono governati principalmente dagli sbalzi termici a cui sono sottoposti i salami durante la conservazione.

Entrambi i modelli consentono di analizzare l'evoluzione del contenuto di umidità in maniera puntuale all'interno del salame al variare delle dimensioni dell'insaccato e delle condizioni di maturazione e conservazione (tempo/temperatura).



## ***PARTE GENERALE***





# **CAPITOLO 1. PRODOTTI INSACCATI E FERMENTATI: IL SALAME**

## **1.1 Definizione**

Il termine salame serve per definire, in maniera molto generica, i prodotti alimentari a base di carne, trattati e conservati per mezzo della salagione.

La sua definizione viene ripresa anche dal Decreto 21.09.05 del Ministero delle Attività Produttive:

“ Si intende per salame il prodotto di salumeria, costituito da carni ottenute da muscolatura striata, appartenente alla carcassa di suino, con aggiunta di sale ed eventualmente di carni di altre specie animali, macinate e miscelate con grasso suino in proporzioni variabili, ed insaccato in budello naturale o artificiale; asciugato e stagionato in condizioni climatiche suscettibili di determinare, nel corso di una graduale riduzione di umidità, l'evolversi di fenomeni fermentativi ed enzimatici naturali, tali da garantire la conservazione e la salubrità in condizioni normali di temperatura ambiente.”

Il salame è un tipico insaccato della tradizione Italiana, infatti soltanto in pochi altri paesi ( per esempio l'Ungheria ) è presente un prodotto simile, di forma cilindrica, più o meno regolare, caratterizzato da una grana (dimensione dei frammenti dell'impasto) più o meno fine e dalla presenza di grasso che può essere sminuzzato insieme con le carni magre o aggiunto sottoforma di lardelli, nella fase di miscelazione dell'impasto.

La consistenza dei salami è generalmente soda e compatta, alcuni particolarmente ricchi di grasso, hanno invece, una consistenza pastosa. Al taglio il salame deve avere una superficie liscia ed omogenea, il colore deve essere rosso tipico, uniforme e più o meno inframmezzato da grasso di colore bianco, che si deve presentare ben demarcato dal magro (unina.it).

La carne maggiormente usata è tradizionalmente quella di maiale, considerata per

quest'uso di maggior pregio, tanto che la normativa italiana vigente impone al produttore di dichiarare in etichetta la tipologia di carne impiegata, se puro suino o misto suino.

Un tipico salame di puro suino segue la seguente formulazione:

- carne di maiale magra 62%
- grasso duro di maiale 33%
- latte magro in polvere 1,8%
- zuccheri 0,5%
- sale 2,5%
- spezie e additivi

Nella composizione delle carni magre utilizzate per produrre i salami, rientrano i muscoli scheletrici di suino, ma anche di bovino o più raramente di altre specie animali ( ad esempio: capra, pecora, cavallo, asino, oca, selvaggina come il cinghiale o frattaglie). La quantità di carne magra può variare ma generalmente è circa il 60-70%. Il grasso è esclusivamente di suino, per motivi organolettici e di conservazione, in particolare grasso della pancetta e di gola, mentre il lardo dorsale e quello proveniente dalla rifilatura della coscia, risulta essere troppo molle e untuoso per essere utilizzato per questo tipo di prodotto. Il sale marino si impiega in concentrazioni di 25-35 g/kg di impasto, la tendenza dei consumatori a preferire prodotti più dolci ha spinto diversi produttori a ridurre le concentrazioni di sale. Saccarosio, destrosio e più raramente lattosio e fruttosio, vengono aggiunti talora in concentrazioni inferiori allo 0,15%, per favorire lo sviluppo microbico, contribuendo alle caratteristiche organolettiche (Cappelli e Vannucci, 2000).

## **1.2 Tipologie di salami**

Il termine “salame” è generico, in realtà esistono moltissimi tipi di salami che si differenziano:

- per l'origine animale della carne, esclusivamente suina oppure mista di bovina, ma anche ovina, caprina, avicola e anche di altri animali;

- per la modalità di preparazione (triturazione) della parte magra;
- per la modalità di preparazione della parte grassa (lardo in cubetti o tritato);
- per l' intensità della salagione, per i tipi di spezie e ingredienti tipici che vengono aggiunti;
- per il tipo di budello impiegato (solitamente suino, ma anche ovino, bovino o equino), o artificiale (cellulosa o collagene quelli più utilizzati) e, di conseguenza, per le dimensioni del prodotto ( la lunghezza può variare dai 10 cm ai 60 cm, il diametro variare dai 3 cm per il cacciatorino ai 20 cm per il crespone), nonché per il tipo di legatura;
- per lo sviluppo di muffe sul budello;
- per le condizioni e i tempi in cui avviene la stagionatura : da 2 settimane per le salsicce stagionate e fino a 6 mesi per i prodotti tradizionali.

Il salame prende normalmente il nome dal tipo di budello usato, dai componenti aggiunti o dalle località in cui viene prodotto. Non di rado, a seconda delle tradizioni locali, possono essere aggiunti come altri ingredienti le rape o il sangue. Esistono un numero svariato di salami (in funzione delle differenze sopra citate), almeno uno o più di uno per regione Italiana, alcuni di questi anche con denominazioni DOP, IGP e PAT come ad esempio: salamini italiani alla cacciatora (*DOP*), salame d'oca di Mortara (*IGP*) e salame Napoli (*PAT:prodotto agroalimentare tradizionale*).

I salami più noti sono: il **salame Milano**, tipico salame lombardo a carne suina e bovina, caratterizzato dalla presenza di aglio, la sua lunghezza è di circa 40 cm, il diametro di 13 cm e la stagionatura varia dai 3 ai 6 mesi.



**Immagine 1: Salame tipo Milano.**

Il **salame Felino**: prodotto tipicamente emiliano della zona di Parma, la sua lunghezza è di circa 50 cm, il diametro di 8 cm, la stagionatura ha una durata di circa 3 mesi, con grandi variazioni di temperatura (dai 20°C ai 10°C).



**Immagine 2: Salame tipo Felino.**

Il **salame tipo Napoletano**: prodotto tipicamente in Campania e altre regioni del sud Italia, si tratta di un prodotto alquanto piccante per l'elevata quantità di pepe e peperoncino aggiunti; è costituito da una miscela di carni bovine e suine, ma insaccato esclusivamente in budello equino, la sua lunghezza è di circa 30 cm e la stagionatura di 2-3 mesi.



**Immagine 3: Salame tipo Napoletano.**

Il **salame di Fabriano**: fa parte della tradizione marchigiana, la sua composizione in carne è di suino misto a bovino, la lunghezza è di circa 40 cm e il diametro di 6 cm, il periodo di stagionatura è di 4 mesi con abbondante sviluppo di muffe sul budello (Zambonelli C., Papa E., Romano P., Suzzi G., Grazia L. 1992).



**Immagine 4: Salame di Fabriano.**

Un numeroso gruppo di prodotti, appartiene alla categoria dei salami a breve stagionatura (massimo 15 giorni) , come salsicce secche fermentate, molto diffuse negli Stati Uniti e i salami cacciatori, tipici delle zone mediterranee. Questi ultimi sono salami stagionati di piccole dimensioni (100-200 gr), ottenuti con un impasto in pari quantità di carne suina e bovina, il grasso aggiunto è pari al 30% , preparati con ricette riconducibili a quelle dei salami classici (come Felino e Milano) e con un contenuto di sale mai superiore al 2,6%.

### 1.3 Tecnologia di produzione

La preparazione del salame avviene secondo le fasi del seguente diagramma di flusso:



**Fig.1 Diagramma di flusso per la produzione di salame.**

La prima operazione consiste nel disosso dei tranci di carne, mediante mondatura, delle parti connettivali di maggiori dimensioni (tendini e aponeurosi) e delle parti di grasso molle. La carne in pezzi è fatta sostare per alcuni giorni in cella frigorifera a 0°C/+2°C, in modo da permettere un certo prosciugamento. La refrigerazione, subito dopo sezionatura, risulta essere molto importante per i tagli destinati alla produzione di salami in quanto la presenza eccessiva di microbi può risultare pregiudizievole per il buon andamento della fermentazione.

Le carni, prima di essere inserite in un tritacarne, possono essere ridotte grossolanamente in pezzi, tramite una spezzatrice o sgrossatrice. È possibile l'automatizzazione di questa fase, in tal caso, il blocco di carne, precedentemente preparato (in base alla tipologia ed alla qualità di salame che si vuole ottenere) e congelato, viene direttamente immesso nel tritacarne.

La triturazione consiste nella macinazione di tagli magri e tagli grassi, miscelati assieme o sotto forma di lardelli pre-cubettati ed altri ingredienti (ad esempio sale), utili all'ottenimento dell'impasto. La triturazione viene eseguita in modo differente in funzione della grana dell'impasto: per i salami a grana media o grande, la triturazione è generalmente eseguita col tritacarne su cui sono montati stampi con trafile idonee a ridurre le carni in pezzi delle dimensioni volute (ad esempio fori 6-8 mm per il salame Felino e 3-3,5 mm per il salame Milano), mentre per i salami a grana fine si preferisce usare il cutter.



**Immagine 5: Fase di macinazione.**

L'impastatura si realizza in apposite macchine mescolatrici previa l'aggiunta degli altri ingredienti. Tutti i componenti aggiunti dovrebbero essere selezionati in modo da avere caratteristiche di igiene idonee, come ad esempio le spezie, che possono essere fonte di contaminazione. Il pepe può essere aggiunto in grani interi oppure macinato. Tutti gli ingredienti devono essere opportunamente pesati e distribuiti in modo omogeneo nell'impasto, mescolati intimamente con esso distribuendosi uniformemente nella massa della carne.

Il componente primario aggiunto nelle diverse tipologie di salame è sicuramente il sale, il quale esercita una delle più importanti modificazioni tecnologiche che caratterizzano e consentono un allungamento della shelf life, determinando la

salagione.

La salagione viene eseguita miscelando direttamente all'impasto cloruro di sodio, in granulazione molto fine che, svolge principalmente la funzione di conservante, ma conferisce anche sapidità al prodotto (Grazia L., Coloretto F., Zambonelli C. 2011).

I restanti ingredienti che vengono aggiunti alla carne in questa fase hanno un loro specifico ruolo:

- le **droghe**, spezie come pepe, cannella, zenzero, chiodi di garofano, anice, noce moscata, zafferano e erbe aromatiche come rosmarino, salvia, finocchio, alloro, basilico, sedano ecc.. hanno funzione aromatizzante e se presenti in dosi massicce, anche inibente nei confronti degli stafilococchi e della flora putrefattiva, per la presenza di sostanze antisettiche come gli oli essenziali;
- gli **zuccheri**, rappresentati dal saccarosio, glucosio, lattosio, fruttosio (dose max concessa dalla legge 1,5% da soli o miscelati) favoriscono la conservabilità degli insaccati, in quanto, costituiscono un substrato per i lattobacilli. Questi, producono acido lattico, abbassano il pH e selezionano la flora batterica, inoltre rendono possibile lo sviluppo del colore rosso (NOMb) e danno luogo a sostanze aromatiche;
- la **polvere di latte magro** e i **caseinati di Na e K**, concessi dalla legge in quantità non superiori al 4 e al 2% rispettivamente, vengono aggiunti per conferire maggiore consistenza e omogeneità all'impasto;
- gli **starter microbici** come *Lactobacillus*, *Pedococcus*, *Micrococcus*, influenzano positivamente la flora batterica complessiva, consentendo la corretta maturazione dell'insaccato e la formazione di nitrosomioglobina e nitrosoemocromo. Il processo innescato da questi microrganismi starter è definito trasformazione per via fermentativa: mediante acidificazione dell'impasto viene impedito lo sviluppo a tutti quei microrganismi che possono provocare alterazioni, favorendo invece lo sviluppo di quelli, che per via fermentativa, trasformano anche profondamente l'alimento, rendendolo nel contempo più gradevole e più serbevole.

- gli **additivi** concessi per gli insaccati sono: *nitriti e nitrati di Na e K* i quali consentono di mantenere stabile il colore dei salumi mediante la formazione di nitrosomioglobina e nitrosoemocromo , inoltre inibiscono gli enterobatteri e selezionano positivamente la flora responsabile della maturazione. *Acido ascorbico e ascorbati* : servono a mantenere allo stato ridotto il ferro mioglobinico, facilitando quindi la formazione di NOMb. *Tocoferoli*: come antiossidanti (Cappelli e Vannucci, 2000).



**Immagine 6: Distribuzione degli ingredienti nell'impasto.**

Subito dopo l'impastatura, il prodotto viene insaccato in budelli naturali o artificiali, questa operazione, nei salumifici industriali, viene eseguita meccanicamente mediante «insaccatrici» in grado di funzionare sottovuoto, riducendo la pressione dell'impasto. L'involucro deve essere tenace, pieghevole, elastico, poroso e aderente. I budelli naturali sono parti dell'intestino di animale suino, bovino, equino o ovino, dopo lo svuotamento devono essere lavati, sgrassati, raschiati e conservati per salagione a secco. Attualmente sono maggiormente impiegati gli involucri sintetici o artificiali, che possono derivare da fibre animali o vegetali (esempio cotone) i quali subiscono il classico trattamento per la produzione di viscosa. I budelli artificiali presentano numerosi vantaggi quali la costanza nel calibro, la mancanza di flora microbica, l'assenza di grassi, l'assenza di odori e la facile spellabilità delle fette. Segue il processo di legatura, il quale consente di mantenere la forma dell'insaccato ed evitare che per gravità l'impasto scivoli verso il basso, molto spesso la fase di legatura è ancora manuale.





**Immagine 7: Fase di legatura manuale.**

Subito dopo l'insacco, i salami sono sottoposti alla stagionatura, nel corso della quale, assumono le caratteristiche proprie dei prodotti finiti. I salami, appesi su appositi supporti, sono messi in camere condizionate e ventilate, dove subiscono un complesso di trasformazioni (per effetto di vari fattori: fisici, microbiologici e biochimici), che nel loro insieme danno luogo alla maturazione (Grazia L., Coloretti F., Zambonelli C. 2011).

La stagionatura consiste in tre fasi distinte che si differenziano per le condizioni diversificate di temperatura, umidità relativa dell'ambiente e durata. Il periodo complessivo della stagionatura varia in funzione del tipo di prodotto (dai 15 ai 90 giorni), in linea di massima, i salami a rapida maturazione sono esposti a temperature più alte, mentre quelli a lunga maturazione a temperature più basse nella prima fase.

Di seguito le fasi di stagionatura:

1) STUFATURA: i salami sono esposti a temperature comprese tra i 18°C e i 26°C, umidità relativa del 84-90%, per un tempo variabile da 1 a 4 giorni. Durante il corso della stufatura si verifica il primo abbassamento di pH e di attività dell'acqua, da 0,97 a 0,93 circa. I batteri lattici iniziano a prendere possesso del terreno nutritivo inibendo così quelli dannosi.

2) ASCIUGAMENTO: la temperatura è abbassata fino a livelli di 16-22°C e l'umidità viene portata a 80-90%. All'interno del salame il pH si abbassa ulteriormente fino a raggiungere i valori compresi tra 5,3 e 4,9 poiché la fermentazione lattica degli zuccheri giunge al termine. L'attività dell'acqua raggiunge i livelli di 0,93 e sul budello lo sviluppo delle muffe inizia a diventare visibile. L'asciugamento può avere una durata dai 5 ai 10 giorni.

3) STAGIONATURA IN SENSO STRETTO: è la fase più lunga (dalle 4 alle 8 settimane), nella quale non si ha sviluppo di batteri e avvengono le reazioni biochimiche che sono alla base della maturazione. La temperatura è mantenuta sui 13°C, l'umidità relativa sul 70%. Sul budello si ha il completo sviluppo di muffe, le quali, consentono di regolare gli scambi idrici tra le differenti parti del prodotto, assicurando un miglior equilibrio idrico tra le parti superficiali e quelle più profonde del prodotto. Infatti il micelio di questi organismi, penetra profondamente nell'impasto e utilizza come fonte energetica l'acido lattico precedentemente formato. Le muffe provocano anche una de acidificazione, che consente poi di avere un leggero rialzo del pH. Successivamente prima della vendita diretta il feltro fungino che ricopre il salame viene allontanato mediante spazzolamento.



**Immagine 8: Salami durante la fase di fioritura.**

Al termine del processo di maturazione (min 15 giorni - max 90 giorni), all'interno del salame, l'umidità diminuirà in misura consistente, passando dai valori iniziali di 50-70% fino ai valori finali di 27-45%. Come conseguenza della perdita di acqua si verificherà una diminuzione dell' $a_w$ , infatti dai valori tipici della carne fresca di 0,98-0,99, si passa a 0,88-0,89, aumentando le concentrazioni di cloruro di sodio. L'aumento di quest'ultimo inibisce i microrganismi presenti e denatura irreversibilmente le proteine che perdono la possibilità di assorbire e legare l'acqua. Il pH si abbassa, passando dai valori iniziali di 5,6-6,2 fino a raggiungerà i valori finali di 4,9-5,3 in funzione della quantità di zucchero impiegato dai batteri lattici. Nel processo di maturazione dei salami, il ruolo primario è svolto dai microrganismi, che se idonei, ne garantiscono la trasformazione e la serbevolezza. Primariamente parliamo di batteri lattici, come agenti della fermentazione lattica e di muffe che

sviluppano sul budello, ad esempio gli aspergilli (genere *Aspergillus*) e i penicilli (genere *Penicillium*); tuttavia è anche possibile trovare microrganismi tossigeni, che rendono il prodotto non commestibile, come *Staphylococcus aureus* e varie specie di muffe.

Gli enterobatteri, che sono i microrganismi di alterazione più importanti in questo prodotto, sono i meno resistenti all'abbassamento dell'  $a_w$ , la rapida disidratazione in fase di stagionatura ne produce la inattivazione. Per quanto riguarda *Clostridium Botulinum*,  $a_w$  e pH degli impasti sono sufficientemente bassi, prossimi ai limiti del suo accrescimento, da impedire la formazione di tossine botuliniche (Zambonelli C., Papa E., Romano P., Suzzi G, Grazia L.1992).

I salumi possono essere confezionati:

- pre-affettati in vaschetta di polistirene , rivestiti con film plastici a barriera e confezionati sotto atmosfera modificata, dette: confezioni salva freschezza.
- interi, come salami di piccola pezzatura o pezzi interi di salumi di più grandi dimensioni. Questi presentano diverse soluzioni di imballo, scelte in funzione delle esigenze aziendali dei salumifici e alla tipologia di trasporto: busta di plastica micro forata, flow pack con confezionamento in atmosfera modificata e sottovuoto in busta di film poliolefinico a barriera o busta termoformata multistrato.

## 1.4 La conservabilità del salame

La conservabilità dei salami è determinata da vari fattori fra loro complementari, i più importanti sono l' $a_w$  e il pH. Da questi dipendono, la moltiplicazione microbica, la selezione dei germi responsabili della corretta maturazione e la scomparsa, più o meno rapida, di quelli dannosi. Nei salami a lunga stagionatura, il fattore più importante è senza dubbio l'abbassamento dell' $a_w$ , in quanto l'abbassamento molto modesto del pH fornisce un contributo trascurabile. L'attività dell'acqua di impasti semplici è determinata essenzialmente dal rapporto sale/acqua, quindi dalla quantità

di cloruro di sodio e di carne magra. Per tale ragione i salami più ricchi di grasso hanno un' $a_w$  più bassa, infatti il tessuto adiposo contiene quantità limitate di acqua (5-10%), mentre quelli magri e «dolci», hanno una  $a_w$  più elevata. Inoltre i salami più grassi contengono una quantità di sale maggiore, poiché il sapore di sale è meno avvertibile, se la percentuale di grasso aggiunto è superiore. La tendenza ad un maggior impiego di sale e di grasso, per creare condizioni più sfavorevoli alle alterazioni, è in contrasto con l'esigenza sempre più sentita di ridurre questi ingredienti. A tale proposito assumono particolare rilevanza tutte quelle operazioni (scelta idonea delle materie prime, refrigerazione accurata ecc) che permettono di ottenere prodotti di buona qualità, indipendentemente dalla quantità di sale impiegato (Del Monte P., Magnani U., Monari M. 1990).

La conservazione dei prodotti confezionati in film plastico o pre-affettati in atmosfera controllata, richiede un controllo meticoloso dei tempi di sosta, al fine di evitare eventuali fermentazioni che alterano le caratteristiche organolettiche dei medesimi prodotti. Le alterazioni più frequenti causate dai microrganismi durante la conservazione sono: formazione di una patina viscida sulla superficie esterna, sviluppo di un odore acido anomalo e rigonfiamento della confezione. Le eventuali confezioni che hanno perso il vuoto vanno comunque scartate perché ciò può aver provocato una contaminazione esogena, con conseguente alterazione del prodotto (Krämer J.1990).

La conservazione ottimale dei salami, finalizzate ad evitare alterazioni microbiologiche e ossidazioni, le quali influiscono sul gusto e sull'aroma del prodotto, sono, in ogni caso, in rapporto all'ambiente di stoccaggio. Ad esempio, al fine di evitare eccessive disidratazioni superficiali, l'ambiente di stoccaggio non deve essere mai troppo caldo e per evitare lo sviluppo di muffe, l'ambiente non deve essere eccessivamente umido, ne deve essere compromessa la circolazione di aria. Particolare riguardo deve inoltre essere posto alle superficie di taglio dell'insaccato esposte all'aria, le quali molto sensibile alla luce e all'ossidazione, necessitano di essere coperta con materiale opaco (Nicolai G. 1989).

# CAPITOLO 2. SIMULAZIONE NUMERICA

## 2.1 Introduzione

L'applicazione della simulazione numerica nel settore dell'ingegneria agroalimentare è piuttosto recente, infatti i modelli numerici sono stati sviluppati principalmente per scopi di ricerca, al fine di poter sperimentare numericamente prima di realizzare fisicamente il prodotto o l'impianto tale metodo fornisce, risultati in maniera rapida ed economica.

L'analisi numerica, ovvero la disciplina che consente la risoluzione di equazioni matematiche (algebriche, funzionali, differenziali e integrali) attraverso algoritmi, ha avuto un ruolo guida nella risoluzione di problemi associati a modelli matematici derivanti dall'ingegneria e dalle scienze applicate. Suo obiettivo è la realizzazione di modelli versatili e affidabili, accurati entro confini dettati dalla specifica classe di problemi da trattare. Una ragione del suo crescente successo è senza dubbio lo sviluppo impetuoso del calcolo scientifico, quella disciplina che consente di tradurre un modello matematico in algoritmi che possono venire trattati e risolti da calcolatori di potenza sempre più elevata.

I modelli matematici offrono nuove possibilità per dominare la crescente complessità delle tecnologie, esplorando rapidamente nuove soluzioni, permettono di accelerare i cicli di innovazione. Essi forniscono un contributo irrinunciabile alla progettazione in numerosi ambiti industriali, con lo scopo di ridurre il ciclo temporale necessario per la concezione di un nuovo prodotto. Ciò assicura un vantaggio potenziale alle aziende, consentendo loro di ridurre i costi ricorrendo sempre di meno agli onerosissimi collaudi, ma anche risparmiando tempo prezioso nella stessa fase di sviluppo.

La simulazione si accompagna spesso al controllo e all'ottimizzazione, con l'obiettivo di progettare dispositivi che soddisfino criteri prestabiliti: maggiore

affidabilità strutturale, migliori prestazioni, minor impatto ambientale; scartando soluzioni all'apparenza innovative e adottandone altre che garantiscano migliori prestazioni.

Attualmente uno dei limiti principali alla diffusione delle tecniche di simulazione numerica nell'industria è costituita dalla necessità di personale specificatamente formato.

## **2.2 Modelli numerici**

I modelli numerici costituiscono la base della simulazione, essi sono costituiti da un insieme di equazioni differenziali in grado di descrivere la geometria e la fisica del problema. Idealmente, un modello completo dovrebbe essere in grado di riprodurre diversi aspetti fisici del problema in oggetto.

I modelli possono essere pensati come una rappresentazione, più o meno fedele, di un prototipo fisico, ma rispetto a quest'ultimo, il modello può avvalersi dei seguenti vantaggi:

- possibilità di verifica e affinamento del progetto mediante tentativi successivi;
- verificare il comportamento dell'impianto in condizioni limite (la verifica può anche avere il carattere di un'analisi di sensibilità, al fine di evidenziare l'influenza delle diverse variabili di processo);
- riduzione di tempi e costi rispetto ad una completa campagna di sperimentazione;
- possibilità di osservare in dettaglio l'intero processo;
- possibilità di compiere osservazioni impossibili da misurare;
- precedere la costruzione di un prototipo.

Oltre ai concetti universali che un modello matematico deve riprodurre – quali, per esempio, la conservazione della massa e dell'energia di un fluido o del momento d'inerzia di una struttura – per una simulazione numerica di successo è necessario stabilire quale livello di dettaglio ha senso inserire nelle diverse componenti di un modello e quali semplificazioni apportare in modo da favorire una sua integrazione

con modelli diversi.

I modelli numerici applicati al settore agroalimentare devono necessariamente considerare una serie di peculiarità, legate alla natura dell'alimento:

- i materiali biologici sono complessi e la disomogeneità non è sempre trascurabile;
- le proprietà fisiche come densità, conducibilità elettrica e termica, calore specifico, diffusività ecc..possono variare in modo importante in funzione della temperatura, dell'umidità, del tempo ecc..;
- le geometrie sono spesso irregolari e differenti (p.e: un prodotto ortofrutticolo);
- i diversi processi fisici che riguardano la preparazione di un alimento sono spesso accoppiati.

La fase di adattamento di un problema fisico alle capacità di descrizione di un modello, consiste nel capire quali elementi della realtà fisica sono trascurabili, ovvero temperare le esigenze di fedeltà del modello con le risorse di calcolo, di tempo, e di capacità professionale.

Il tempo in questo senso svolge spesso un ruolo cruciale, è bene infatti trovare una soluzione soddisfacente del problema entro il termine prefissato, piuttosto che una soluzione completa quando non se ne ha più bisogno (Nikolaj S. Bachvalov, 1981).

In molti problemi che ammettono modelli matematici espressi in forma differenziale, non è possibile ottenere una soluzione in forma chiusa, cioè una espressione matematica che dia i valori delle incognite che descrivano lo stato del sistema in ogni punto del corpo. Per problemi che coinvolgono proprietà dei materiali, geometria e condizioni al contorno, si deve ricorrere a metodi numerici che permettano di ottenere soluzioni approssimate. A tale proposito i modelli numerici possono considerare diverse soluzioni: *metodo numerico dei volumi finiti* (FVM), dove l'interno del dominio viene suddiviso in tanti volumi elementari, quindi tramite la forma integrale delle equazioni del problema considerato vengono scritte le relazioni che intercorrono tra i vari volumetti confinanti, così da poter essere risolte per via numerica con l'ausilio del calcolatore. L'approssimazione risiede nel fatto che tali volumetti hanno dimensione finita e non infinitesima. *Metodi numerici degli elementi finiti* (FEM),

questo mantiene una posizione dominante nel panorama delle tecniche numeriche di approssimazione. In generale, il metodo agli elementi finiti si presta molto bene a risolvere equazioni quando il dominio ha forma complessa, quando il dominio è variabile (per esempio una reazione a stato solido con condizioni al contorno variabili), quando l'accuratezza richiesta alla soluzione non è omogenea sul dominio (ma più accurata solo in alcune zone) e quando la soluzione cercata manca di regolarità. *Metodi numerici delle differenze finite* (FDM), è un metodo per risolvere numericamente equazioni differenziali. È di gran lunga il metodo più semplice e intuitivo tra tutti e permette anche una facile analisi di convergenza.

Nonostante il metodo delle differenze finite sia concettualmente più semplice da programmare rispetto al FEM e al FVM, questi ultimi sono più potenti e versatili, in grado di affrontare geometrie arbitrarie, adattabili a problemi complessi e con capacità di fornire risultati notevolmente precisi.

Sia il metodo dei volumi finiti che quello degli elementi finiti sono in grado di simulare fenomeni, quali trasferimenti di calore e di massa, radiazioni, fluidodinamica, ma anche processi chimici e biochimici che inducono la perdita della qualità negli alimenti (ad esempio: alterazioni di texture, perdita di vitamine o pigmenti responsabili del colore), (Ghanem, 1997a, Ghanem, 1997b, Martins, 2004).

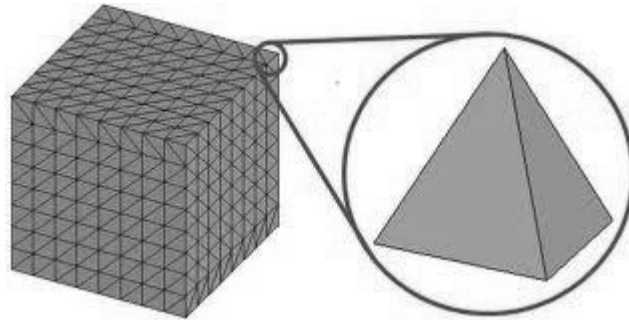
### **2.3 Creazione del modello numerico ad elementi finiti**

Il metodo degli elementi finiti (FEM) ha la sua origine nel campo dell'analisi strutturale, ma la sua natura polivalente ne ha reso possibile l'applicazione anche in altri campi dell'ingegneria. Il metodo degli elementi o volumi finiti (EF) prende in esame, una serie di tecniche di calcolo, applicabili a molti problemi di fluidodinamica, termodinamica e elasticità. Uno dei principali vantaggi nell'impiego degli elementi finiti è dato dall'ottimo approccio che presentano per simulare complessi processi chimico-fisici, quali, passaggi di stato critici, trasferimenti di



calore e di massa.

La sua creazione consiste nel suddividere il dominio sottoposto allo studio, in semplici forme, come triangoli e quadrilateri sul piano, non sovrapposte fra loro, detti elementi finiti (in contrapposizione agli infinitesimi).

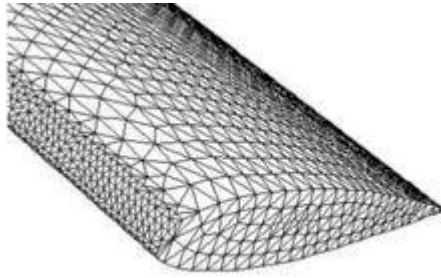


**Figura 2: Rappresentazione di un elemento finito**

Il metodo si basa sulla possibilità, di considerare costanti, le proprietà chimico-fisiche di ognuno dei volumi finiti presenti all'interno del dominio preso in esame. In questo modo, ogni elemento, risulta essere definito e posizionato tramite i propri vertici (detti nodi), il modello individuerà soltanto un certo numero di punti sull'intero dominio continuo di partenza. Questa operazione è definita *discretizzazione*.

Elementi adiacenti l'uno all'altro condividono nodi comuni, si viene in questo modo a forma una sorta di griglia (*mesh/ meshing*) che consente di descrivere la geometria e la struttura il più possibile simile a quella originaria; sono quindi l'insieme dei nodi e degli elementi a descrivere l'intera geometria iniziale.

I F.E.M., come i F.D.M., si basano su metodi di discretizzazione, tuttavia i primi hanno sui secondi l'ulteriore vantaggio di poter utilizzare passi di discretizzazione variabili. In questo modo l'efficienza di calcolo aumenta notevolmente, poiché è possibile infittire la mesh solo nei punti di maggior interesse, lasciando invece maglie più larghe nel resto del dominio.



**Figura 3: Rappresentazione di una mesh**

L'interpolazione tra due nodi della mesh può inoltre essere eseguita con varie tipologie di funzioni, non esclusivamente lineari, come nel caso delle differenze finite. Tuttavia i F.E.M. presentano una elevata complessità del metodo e questo si riflette completamente nella difficoltà di programmazione.

Il procedimento di posizionamento dei nodi deve considerare alcune peculiarità:

1. il numero dei nodi deve essere sufficiente a descrivere la geometria della struttura;
2. i nodi devono essere posizionati anche sulle linee e sui punti di continuità (ad esempio dove cambiano le caratteristiche dei materiali o le caratteristiche delle sezioni);
3. i nodi possono essere posizionati in punti non necessari alla definizione geometrica, ma ove si vogliono conoscere le sollecitazioni meccaniche;
4. si devono mettere i nodi in tutti i punti che si intendono vincolare;
5. nel caso di strutture bidimensionali la suddivisione in elementi finiti deve essere sufficientemente fitta per poter cogliere le variazioni nelle regioni importanti ai fini dell'analisi.

Per rendere gestibile il calcolo numerico, ai nodi vengono assegnate condizioni al contorno (ad esempio la temperatura) ed agli elementi equazioni composte, attraverso un principio fisico adeguato al problema specifico (ad esempio condizione di energia), al fine di ottenere un sistema di equazioni linearizzabili localmente. In questo modo, ciascun elemento, da una funzione in forma semplice, viceversa, l'inserimento delle proprietà fisiche all'interno del dominio, sarebbe espressa da equazioni impossibili da integrare.

Dunque, piuttosto che risolvere direttamente il problema originario, in tutta la sua complessità, si formulano soluzioni per ciascuna unità elementare che vengono successivamente combinate per ottenere la soluzione della struttura originale (Sadiku, 1989).

Operativamente la costruzione di un modello numerico include tre fasi:

- la fase di *preprocessing* che definisce il problema della geometria, delle condizioni al contorno e delle proprietà dei materiali coinvolti ( in questo senso la fase di realizzazione della mesh deve essere sufficientemente accurata nel ricalcare la geometria del prodotto, maggiore è la quantità degli elementi più accurata è la risoluzione del problema). Questa fase è la più impegnativa per l'utente ed è quella che richiede la maggior quantità di tempo.
- la fase di *solving*, dove il software assembla le equazioni che descrivono il problema e ne importa la risoluzione per via numerica;
- la fase di *post processing*, che consiste nella valutazione delle soluzioni, attraverso la visualizzazione dei valori scalari o vettoriali, come ad esempio pressioni, temperature, tensioni, spostamenti ecc.

Occorre sempre quantificare l'affidabilità dei risultati ottenuti, ovvero non impiegare il pacchetto di calcolo a scatola chiusa seppur esso goda di credito riconosciuto, a tal fine, è importante conoscere i punti di forza del pacchetto di calcolo disponibile. La fase di adattamento di un problema fisico alle capacità di descrizione di un modello è quella che necessita maggiore esperienza e creatività. Risulta inoltre di grande sostegno, confrontare i valori presi in letteratura o di origine sperimentale, con quelli derivanti da dispositivi di laboratorio, di geometria il più possibile simili, funzionanti in condizioni standard o ancora con dati misurabili con facilità. I software odierni impiegati per il calcolo numerico, dispongono di estese funzionalità per la rappresentazione grafica dei risultati, come grafici in falsi colori, sezioni trasversali, curve isocline, campi vettoriali, linee di corrente, particle tracing; questi permettono una osservazione dettagliata del processo in analisi, generalmente non possibile con la sola sperimentazione.

L'applicazione della simulazione computazionale, basata sul metodo degli elementi finiti, è in forte aumento nel settore dell'ingegneria agro alimentare. Differenti metodi numerici possono essere utile nella descrizione dei processi di sterilizzazione, surgelazione e disidratazione con o senza l'inserimento all'interno del modello matematico, dei coefficienti che descrivono le condizioni al contorno. Modelli matematici di questo tipo, devono essere validati con dati sperimentali, in quanto basati su approssimazioni e ipotesi, necessitano quindi di essere allineati con le conoscenze in campo alimenti. Ci si aspetta nei prossimi anni un considerevole aumento delle tecniche di simulazione numerica nel settore alimentare, principalmente perché queste consentono di ridurre tempi e costi. La simulazione computazionale, inoltre, risulta essere un valido strumento ingegneristico, impiegato come ausilio per ottimizzare e visualizzare nel dettaglio i processi fluidodinamici, di trasferimento di massa e calore durante i processi termici (Roberto A. *et al.* 2011).

## **2.4 Simulazione per la soluzione di metodi inversi**

Per anni, la stima delle proprietà della materia, è stata condotta cercando di giungere direttamente a dei modelli affidabili, in grado di descrivere e quindi di misurare i parametri, in relazione ai dati misurati empiricamente. L'approccio mediante metodo inverso consente di descrivere matematicamente la relazione fra i valori misurati e le proprietà incognite, con lo scopo di esprimere direttamente i parametri in termini di dati misurati, ottenendo quindi i parametri in modo diretto (Mendonça *et al.* 2005).

I metodi basati sulla formulazione di problemi inversi sono applicati in differenti aree della fisica, nella determinazione di parametri. Questi, infatti, permettono di predire i valori dei parametri a partire dalla conoscenza dei differenti stati delle variabili, in cui il processo si trova (Simpson & Cortes, 2004).

Ad esempio, basandosi sulla formulazione di un problema inverso, dati sperimentali relativi al cambiamento di umidità durante un processo di disidratazione, possono essere impiegati per determinare il valore ignoto del coefficiente di trasferimento di

massa (Bialobrzewski & Markowski, 2004).

Lo schema utilizzato durante la risoluzione di un problema diretto è il seguente:



L'attendibilità del metodo, nel problema diretto, dipende non solo dalla percentuale di dati che risultano essere ben correlati, ma anche dalla numerosità delle rilevazioni e della loro ripetibilità, quindi, da lunghi tempi impiegati per la raccolta dati e dalla loro precisione. L'esito in fase sperimentale, della raccolta dei dati non è però sempre soddisfacente, a causa dei numerosi errori che l'operatore può incorrere, al momento della misurazione.

Nel modello del metodo inverso, si crea invece una relazione matematica, che esprime il legame tra i dati e i parametri, questo consente di ottenere modelli attendibili, ricorrendo a prassi più snelle.

In questo caso lo schema da seguire è il seguente:



Ma negli esperimenti condotti in condizioni reali, può non esservi un unico modello. Ci sono infatti molti modelli che rendono conto dei dati in maniera egualmente ineccepibile. Il modello ottenuto da tale metodo non è quindi necessariamente uguale al vero modello che si vuole trovare.

In condizioni reali infatti, il “problema inverso” consiste in due fasi:

- 1) Che sia definito il modello reale e i dati sperimentarli (variabili). Da questi ultimi si ricostruisce il modello stimato, questa prima fase è detta «*problema della stima*». Il modello stimato deve necessariamente essere coerente con i dati misurati ed è necessario cercare la relazione che lega, il modello stimato con quello reale.

La determinazione di quali proprietà del modello reale siano ottenute grazie al

modello stimato e quali errori invece sono annessi ad esso è definita «*problema della valutazione*». Il modello reale non corrisponderà quindi né ad un unico modello stimato, né a quello da noi prescelto.

- 2) Riconoscere gli errori del modello stimato in base a quello reale. Senza questa fase non avrebbe senso dare un'interpretazione fisica del modello, costruito con i dati sperimentali.

Esistono due ragioni per le quali il modello stimato e quello reale risultano differenti:

- la non unicità del problema inverso, può generare modelli capaci di correlare in modo egualmente soddisfacente i dati;
- i dati sperimentali di partenza sono contaminati da errori che il modello stimato conserva.

Per questa ragione la fase del «*problema di valutazione*» rivela due aspetti: la propagazione degli errori e la non unicità della risoluzione. Quest'ultima costituisce uno dei problemi più spinosi del metodo. È quindi bene riferirsi ad un criterio di scelta per selezionare il modello che soddisferà meglio la relazione del modello stimato con quello reale, rendendo conto dei dati di partenza; un esempio è quello di prediligere la combinazione dei parametri. Questa condizione, solitamente è garantita da un'unica soluzione, stimata usando una risoluzione numerica. Ma una volta ottenuta, resta comunque da capire qual è, fra i modelli stimati con i parametri sperimentali, la combinazione di parametri più probabile. I dati misurati e altre informazioni sono usati per costruire una funzione di densità di probabilità. La stima di parametri che giustificano i dati, è probabile se la stima dei dati da esso provenienti, è ragionevolmente vicina ai dati reali misurati all'inizio (Maiçon P. 2004).

L'approccio nei confronti di un metodo inverso, potrebbe essere organizzato come segue:

- ❖ determinazione sperimentale di dati in condizioni tali da rendere semplice la misura (es. in condizioni di stazionarietà, o determinazioni integrali nello spazio

o nel tempo);

- ❖ costruzione di un modello numerico (simulazione numerica) in grado di riprodurre il sistema in osservazione;
- ❖ determinazione dei parametri del modello attraverso la ricerca delle condizioni di minima distanza tra dati calcolati e dati osservati.





## CAPITOLO 3. STATO DELL'ARTE

Definire accuratamente le condizioni necessarie per ottenere una buona maturazione e stagionatura dei prodotti insaccati, risulta di necessaria importanza, perché è proprio durante questi processi che avvengono i cambiamenti di maggior interesse, dal punto di vista fisico (perdita di peso), chimico-fisico e microbiologico. In particolare durante la stagionatura dei salami avvengono principalmente due fenomeni di trasferimento di massa, quello dell'acqua e quello dei soluti.

La simulazione numerica risulta essere un metodo rapido ed efficiente per descrivere, il trasferimenti (durante cottura e/o refrigerazione) di acqua e di altri soluti all'interno degli alimenti (Kondjoyan & Havet 2003; Valdramidis et al. 2005).

In letteratura sono presenti vari studi relativi all'utilizzo dei metodi numerici per descrivere i fenomeni di trasferimento di massa che avvengono all'interno degli alimenti durante le fasi di stagionatura e conservazione. Di seguito viene proposta una rassegna dei lavori più interessanti relativi all'utilizzo della simulazione numerica per lo studio dei fenomeni diffusivi nei prodotti carnei.

**Costa-Corredor A. et al.(2010)** hanno condotto uno studio sul processo di diffusione simultanea di acqua e sale all'interno del salume, considerando un impasto di carne di maiale tritata. L'impasto conteneva diversi ingredienti e condimenti tra cui il sale, utile per il processi di salagione e successivamente di stagionatura.

Sebbene il trasferimento dei soluti sia possibile descriverlo mediante la legge di Fick, questa non risulta però adatta ad esprimere il passaggio contemporaneo e opposto delle due specie (acqua e soluti) all'interno di un impasto di carne tritata. A tale scopo è stata impiegata l'equazione di Stefan–Maxwell (GSM) che meglio si adatta alla presenza di una struttura non omogenea come quella presa in esame, inoltre la forma allungata dell'insaccato, rappresenta un altro ostacolo nel processo di diffusione rappresentato da Fick, ma valicabile con la GSM.

L'impiego dell'equazione Stefan–Maxwell ha dimostrato con successo la possibilità di simulare la diffusione di acqua e sale all'interno del prodotto salame sottoposto

alla stagionatura, in particolar modo essa si è mostrata particolarmente adatta nella descrizione del profilo di diffusione dell'acqua, ma in maniera meno soddisfacente nei confronti dell'andamento diffusionale del sale, specialmente a metà del periodo della stagionatura. Si è inoltre potuto dimostrare che l'attività diffusionale delle due tipologie prese in esame, acqua e sale, risulta essere maggiormente dipendente dal quantitativo di acqua presente e quindi si manifesta di più nella carne fresca. In media la diffusività del sale è tre volte più alta rispetto a quella dell'acqua.

**Trujillo F.J. et al. (2007)** hanno preso in esame il processo di diffusione dell'acqua all'interno della carne di manzo, considerando tale fenomeno principalmente perpendicolare alle fibre di cui essa è costituita. Le determinazioni sperimentali, durante disidratazione, sono state considerate all'interno di un intervallo di temperatura compreso tra 6.6°C e 40.4°C.

Tre differenti metodi matematici sono stati usati per determinare la diffusività durante disidratazione: il primo assume costante la diffusività, la temperatura e il volume e nulla la resistenza superficiale al trasferimento di massa. Il secondo assume condizioni al contorno ventilate ed il terzo, considera la riduzione del volume dei campioni durante la disidratazione.

Importanti differenze si sono manifestate in termini di diffusività con l'impiego di questi tre diversi metodi, in particolare modo il terzo che considera, il restringimento di volume dei campioni, è quello che ha consentito di ottenere dati migliori, in quanto rappresenta meglio l'andamento del processo di disidratazione, infatti durante la disidratazione si assiste ad un restringimento del campione del 70,3%. L'equazione di Arrhenius si è inoltre impiegata nel calcolo della diffusività in quanto ne esprime la dipendenza dalla temperatura.

I risultati di questo studio dimostrano che si è potuto determinare con successo la diffusività dell'acqua lungo le fibre perpendicolari della carne in esame. Nello specifico il terzo modello, a differenza degli altri, considerando il restringimento di volume dei campioni durante la disidratazione, consente di determinare la diversa

diffusività dell'acqua nella carne paragonato ad altri prodotti alimentari con elevati tassi di umidità. Le diversità emerse tra il primo e il secondo modello riguardano la resistenza superficiale al trasferimento di calore e al cambiamento di temperatura, in modo particolare, a basse temperature (circa 25°C), dove la dipendenza tra diffusività e temperatura è stata accuratamente espressa dall'equazione di Arrhenius, la diffusività effettiva dipende dal contenuto di umidità del sistema carne. Il contenuto di umidità diminuisce, aumentando di molto la diffusività, probabilmente dovuto ad una apertura dei pori e dei capillari all'interno della struttura della carne stessa.

**La Page Jean-François *et al.* (2009)** hanno studiato il trasferimento di calore e acqua in prodotti conservati sotto flusso di aria, come ad esempio formaggi, frutta e carne, intendendo tutta quella serie di processi produttivi volti a operazioni di disidratazione, refrigerazione, cottura ecc, tramite un modello CFD (Computational Fluid Dynamics). Durante i trattamenti con flussi d'aria gli alimenti presentano forti variazioni in termini di temperatura della superficie, attività dell'acqua, diffusività dell'acqua, tutte variazioni che dipendono principalmente da variabili del flusso d'aria come temperatura, umidità relativa, velocità e intensità delle turbolenze.

Il modello CFD combinato a sperimentazioni specifiche per la determinazione dei coefficienti di diffusione di acqua e calore, ha consentito di realizzare una simulazione che mettesse in relazione il flusso di aria, a cui gli alimenti erano soggetti, con i trasferimenti di calore e acqua. Il modello ha richiesto specifiche valutazioni riguardanti l'evaporazione dell'acqua dalla superficie del prodotto e la velocità dell'aria che è stata valutata considerando un volume definito attorno al prodotto preso in esame. La diffusività dell'acqua interna al prodotto è stata considerata come immobilità di flusso tra sostanza secca e acqua. Le cinetiche di perdita d'acqua da parte del prodotto sono state determinate considerando la temperatura e l'umidità relativa del flusso di aria in contatto con l'alimento.

Il modello CFD ha reso possibile la simulazione mettendo in relazione il flusso d'aria con i trasferimenti di calore e di acqua oggetto di studio.

I risultati hanno dimostrato che il modello è utile per calcolare temperature e concentrazioni di acqua, determinare cinetiche di perdite d'acqua in prodotti umidi, associate alla temperatura e umidità relativa del flusso d'aria che passa sull'alimento.

**Grassi A. e Montanari R. (2005)** hanno condotto uno studio per la definizione di un modello termodinamico con lo scopo di simulare temperatura dell'aria e umidità all'interno delle camere di stagionatura dei salami, caratterizzate da un flusso ascendente di aria. Temperatura e umidità all'interno delle celle sono però influenzate dalle caratteristiche geometriche delle celle stesse, dal tipo, dal numero e dalla relativa posizione dei salami soggetti a stagionatura e non ultimo dai fattori fluido-dinamici del flusso d'aria introdotto all'interno delle camere di stagionatura.

Il modello di simulazione considera due principali elementi: il fenomeno fluido dinamico, presente nelle celle nelle quali il flusso di aria all'interno delle camere è prodotto da una rete di tubature crociate ed il fenomeno che considera la disidratazione dei salami, tenendo conto degli scambi di massa e calore tra la superficie dei salami e i flussi di aria che passano al di sopra di esso. Per risolvere il primo modello si è impiegato il metodo Hardy Cross, mentre per il secondo il modello Oswin, per il quale gli scambi di umidità tra il flusso di aria e la superficie (considerata unitaria) dei salami, è assunta proporzionale alla differenza tra l' $A_w$  e l'umidità relativa dell'aria.

La necessità dell'impiego di flussi ascendenti di aria all'interno delle celle di stagionatura nasce dal crescente bisogno, da parte delle aziende produttrici di salami, di stagionare un numero sempre maggiore di prodotto in tempi brevi. A tale proposito, i risultati di questa simulazione numerica di parametri termodinamici, offrono la possibilità di stimare temperatura e umidità all'interno delle camere, in funzione delle condizioni sopra menzionate: geometria delle celle, tipologia, numero e posizione dei salami soggetti a stagionatura e caratteristiche del flusso d'aria.

**Bertolini M. et al. (2006)** hanno condotto una ricerca sugli impianti di stagionatura dei salami, caratterizzati da un flusso ascendente di aria, con lo scopo di studiare e ottimizzare il processo di stagionatura da un punto di vista microbiologico, chimico e fisico. I ricercatori hanno effettuato una simulazione basata su due modelli: il primo fluidodinamico, in grado di definire la velocità dell'aria in ogni punto della camera di stagionatura e il secondo termodinamico, costruito per determinare temperatura e umidità dell'aria e dei salami in funzione del tempo. Il processo di simulazione gestisce i due modelli, coordinando i dati provenienti da ciascuno.

Il software impiegato per la simulazione del processo di stagionatura, piuttosto che considerare la variazione della velocità dell'aria all'interno delle camere in funzione dello spazio, simula l'andamento dei parametri (umidità assoluta, temperatura ecc) in funzione del tempo. In particolare modo, lo studio di ottimizzazione, si basa sulla estrapolazione di variabili che esprimono caratteristiche cinetiche dell'aria all'interno delle camere di stagionatura, al fine di massimizzare la qualità dei salami in termini di uniformità e perdita di peso. Per la sperimentazione sono stati considerati differenti tipologie di salami, sei in totale.

I dati ottenuti durante sperimentazione sono stati impiegati per calibrare e validare il modello. Questa procedura ha reso possibile l'ottenimento di un modello flessibile di supporto sia al disegno delle celle che al processo di stagionatura, considerato che gli aspetti quali e quantitativi sono strettamente in funzione delle condizioni impostate dall'operatore.

I risultati del modello appaiono in linea con quelli sperimentali, in particolar modo i dati ottenuti mediante simulazione mostrano piccole differenze rispetto a quelli sperimentali, sia da un punto di vista qualitativo che quantitativo. Probabilmente queste variazioni, sono da ricondursi al fatto che durante stagionatura il prodotto si modifica. In particolare, durante i primi giorni di stagionatura, la totalità dell'acqua presente all'interno del salame è allo stato liquido e non gassoso, questo tipo di fenomeno non è stato gestito dal simulatore. Viceversa, nelle fasi di stagionatura successive (dopo i primi giorni) i dati sperimentali e quelli provenienti dalla

simulazione si riavvicinano, dimostrando di essere in grado di predire l'andamento dell'umidità dei salami con il trascorrere del tempo, fino al valore di fine stagionatura.

I risultati di questa ricerca mostrano una corrispondenza positiva tra i dati rilevati sperimentalmente e quelli simulati, il processo di simulazione può quindi rappresentare un importante strumento per stimare l'andamento qualitativo e quantitativo dei salami, in ciascuna fase del processo di stagionatura in termini di parametri termo-fisici. In definitiva il modello può essere utilizzato al fine di ricercare e ottimizzare le soluzioni legate alla gestione di celle di stagionatura degli insaccati. In modo particolare, la perdita di peso dei salami è stata impiegata come indicatore principale nel definire l'efficacia del trattamento di stagionatura (in termini di uniformità e livello di stagionatura), in quanto la perdita di peso è funzione dell'oscillazione, costantemente presente, del flusso di aria all'interno delle camere.

**Rizzo Antonio (2003)** si è occupato di simulazione fluido dinamica, trattata mediante metodo parametrico, in camere di stagionatura di salumi caratterizzate da flusso ascendente di aria. Questo modello parametrico, per le proprie peculiarità, consente principalmente di operare con flessibilità e di simulare in maniera soddisfacente i flussi d'aria all'interno delle camere, in funzione delle diverse condizioni operative. Infatti il modello non è stato pensato per una sola applicazione, ma piuttosto per stimare le caratteristiche finali del salume stagionato in funzione della variazione delle caratteristiche programmate all'interno della camera di stagionatura. Inoltre, il modello vuole essere di supporto per l'operazione di scelta delle condizioni migliori di stagionatura da sottoporre a ciascuna tipologia di salume.

Questo studio è stato suddiviso in due parti: la prima necessaria alla raccolta dei dati sperimentali, acquisiti in celle pilota e la seconda nella progettazione e realizzazione del modello numerico.

Il modello preso in esame in questo studio impiega dati sulle caratteristiche geometriche delle celle (es: altezza, lunghezza, posizione e diametro degli ugelli

d'aria ecc.), sulle condizioni fluido-dinamiche dell'aria e sulle caratteristiche dei salami sottoposti a stagionatura (tipo, numero e posizione), restituendo dati relativi alla velocità dei flussi d'aria (direzione e modulo) caratteristici della cella. Il modello in uscita è descritto da una geometria in 2D, la quale consente di ben definire le mura delle celle come anche la superficie dei salami.

Comparando i modelli di simulazione dei flussi d'aria con i dati sperimentali ottenuti nelle celle pilota, i risultati mostrano che il modello può essere considerato valido.

**Poomjai Sa-adchom *et al.* (2011)** hanno condotto uno studio basato su un modello semi-empirico per stimare il valore del coefficiente di diffusività dell'umidità ( $D_{\text{eff}}$ ) su fette di carne di maiale sottoposte a liofilizzazione. Lo studio è finalizzato a predire l'andamento della temperatura nel punto centrale delle fette e l'evoluzione del contenuto di umidità durante il trattamento. Il modello era basato su equazioni che descrivono la conservazione della massa e il bilancio di energia. Il modello considera tre fasi di trattamento: assorbimento di calore, processo di disidratazione costante e parte finale di disidratazione. Il modello è stato risolto impiegando il metodo delle differenze finite. I dati risultanti sono stati comparati con i dati sperimentali ottenuti in liofilizzazione a 140°C di fette di carne di maiale di uno spessore compreso tra 1 e 2 mm con e senza condimento.

Il confronto fra i dati mostra che il modello può stimare un intervallo di valori di  $D_{\text{eff}}$  e può predire l'evoluzione del contenuto di umidità all'interno delle fette di carne. I dati ottenuti per via numerica riguardanti la temperatura "al cuore" delle fette di carne risultano leggermente diversi da quelli sperimentali durante la prima fase del processo di liofilizzazione (assorbimento di calore) e durante i primi 5 minuti dell'ultima fase del trattamento. Si trovano invece in accordo costante durante il periodo centrale del processo (disidratazione costante) e per gli ultimi 10 minuti di trattamento. È stato inoltre mostrato che lo spessore e la presenza o meno del condimento delle fette di carne di maiale, influenza le curve di disidratazione, ma esclusivamente nella fase centrale del trattamento di liofilizzazione e nella fase finale.

In particolar modo, si è visto che l'intervallo stimato di  $D_{\text{eff}}$  diminuisce il suo valore quando la carne trattata è sottoposta a condimento, probabilmente perché la diffusione dell'umidità interna è ostacolata dalla presenza dei soluti della soluzione di condimento. Inoltre, l'intervallo stimato di  $D_{\text{eff}}$  diminuisce nelle fette sottoposte a trattamento, quando il suo spessore è di 1mm rispetto che a 2mm, dovuto probabilmente ad un effetto di durezza superficiale.

**Sebastian P. et al. (2005)** hanno condotto una ricerca su un modello dinamico, volto allo studio del trasferimento di massa e calore di prodotti insaccati a base di carne di maiale, sottoposti a processo di stagionatura e affumicatura. Entrambi i trattamenti avvengono all'interno della stessa camera.

In particolar modo questo modello è stato studiato per essere di supporto alla costruzione e realizzazione di un impianto pilota, nel quale la zona di generazione di fumo si trovi separata dalla zona di generazione del calore. Questa separazione consentirebbe di eliminare il depositarsi di benzo(a)pirene (molecola tossica) sulla superficie dei prodotti.

Una prima parte dello studio è focalizzata alla raccolta di dati sperimentali riguardanti la perdita di massa dei salumi durante il trattamento ed la variazioni di temperatura all'interno delle camere di affumicatura e stagionatura come anche all'interno degli insaccati. I dati sperimentali sono stati ottenuti da campioni sottoposti al trattamento, all'interno di camere attualmente in uso nella produzione di prodotti affumicati.

Successivamente i dati sperimentali sono stati messi in relazione ai risultati della simulazione numerica.

I risultati mostrano che i valori in uscita dal modello sono in linea con le prove sperimentali riguardanti le cinetiche di disidratazione e il flusso di gravitazione dell'acqua da parte dei salumi. A tale proposito i risultati analizzati dal modello possono essere usati come supporto alla realizzazione dell'impianto pilota.



**Graiver N. et al. (2009)** hanno sviluppato un modello matematico sull'assorbimento di sali ( $\text{NaNO}_2$ ,  $\text{KNO}_3$  e  $\text{NaCl}$ ), durante salagione di tranci di carne di maiale. In questo modello sono state considerate equazioni differenziali riguardanti i trasferimenti di massa, risolte numericamente in una geometria 3D (cilindri finiti), considerando la diffusività e il diverso contributo convettivo dei diversi sali impiegati in salagione, considerando anche l'assorbimento di acqua da parte dei tessuti. Questo modello matematico può essere di aiuto per comprendere meglio il fenomeno di trasporto e controllare le variabili che interagiscono nel processo di salagione, come i tempi e le concentrazioni dei sali. In particolare, per poter predire industrialmente il tempo necessario al quale sottoporre le carni a salagione, senza superare il valore massimo di nitriti consentito (200 ppm) ed avere una concentrazione accettabile di cloruro di sodio. In favore di questo ultimo punto, ovvero stabilire la quantità di sale necessario, è stato considerato il coefficiente di diffusività di  $\text{NaCl}$ , a diverse concentrazioni.

Il modello numerico è stato validato impiegando dati ottenuti per via sperimentale della diffusività dei sali ( $\text{NaNO}_2$ ,  $\text{KNO}_3$  e  $\text{NaCl}$ ), in cilindri di carne di maiale di diverso diametro, a differenti tempi di contatto delle carni con i sali, durante salagione.

I risultati mostrano che al progressivo aumento del gradiente di concentrazione di  $\text{NaCl}$  all'interno della microstruttura delle carni, sottoposte a salagione, si affianca una diminuzione della diffusione degli altri sali (in particolare  $\text{NaNO}_2$ ). Il modello è utile per determinare la quantità di sale necessario per effettuare un buon processo di salagione.

**Barat J.M. et al. (2011)** hanno studiato un modello matematico in grado di descrivere e quantificare il trasferimento del sale durante il processo di salagione di carne di maiale. In particolar modo è stato considerato il processo diffusivo di due tipologie di sali:  $\text{NaCl}$  e  $\text{KCl}$ , determinando i coefficienti di diffusione degli ioni K e Na durante la fase di salagione. Il lavoro è finalizzato allo studio della possibilità di

diminuire il contenuto totale di sale all'interno di un prodotto stagionato.

Questo approccio tiene in considerazione alcune peculiarità: 1) determinazione rigorosa delle cinetiche di diffusione del sale, considerando la concentrazione del sale disciolto in una fase liquida all'interno del prodotto e non come concentrazione di sale nel suo complesso; 2) particolare accuratezza nella determinazione delle condizioni di equilibrio della concentrazione di sale all'interno e all'esterno del prodotto; 3) considerazione dei coefficienti di trasferimento di massa riguardanti le condizioni al contorno del prodotto (così da dare una dimensione al modello e considerare anche i coefficienti di trasferimento di massa nella parte esterna del prodotto); 4) il processo diffusivo e la determinazione dei coefficienti di diffusività del sale sono stati considerati in funzione del tempo.

I risultati sono stati confrontati con dati ottenuti per via sperimentale e mostrano una concreta relazione tra il processo diffusivo e il tempo. Il modello necessita di essere implementato da dettagli fisici e chimici, come parametri che approfondiscano il ruolo dell'acqua e dei cambiamenti della struttura del prodotto durante salagione, così da poter descrivere con maggiore accuratezza l'intero processo.

**Vodyanova I.V. et al. (2012)** si sono occupati dello studio di un modello matematico che descrive l'unione del sale alla carne tritata, durante il processo di triturazione e impasto per la produzione di insaccati. L'obiettivo dello studio è stato quello di capire come il sale (NaCl) viene inglobato dalla carne tritata, così da poter stimare la sua concentrazione e l'influenza sull'impasto di carne ( $a_w$ , capacità emulsionante, texture, viscosità ecc.). La diffusione del sale nella matrice carnea, in oggetto in questo studio, avviene in seguito alla contemporanea riduzione della carne in impasto, mediante delle lame e impastamento in una impastatrice in rotazione.

I risultati del modello messi in comparazione con quelli ottenuti sperimentalmente, mostrano che le equazioni ottenute sono in grado di descrivere in maniera appropriata il processo. In particolar modo, che la posizione dei coltelli in fase di triturazione influenza l'acquisizione di sale da parte dell'impasto e che il sale viene inglobato

dall'impasto di carne nella stessa direzione di rotazione dell'impasto. Si trovano invece in disaccordo per quanto riguarda i tempi di impastamento: i dati sperimentali determinano che sono necessarie 30 rotazioni dell'impastatrice, pari a 3.5 minuti, per creare una omogenea distribuzione di sale nella carne, viceversa il modello stima 60 rotazione dell'impastatrice, pari a 7 minuti. Questa differenza, tra processo teorico e reale, può essere spiegata considerando il fatto che l'equazione matematica non tiene conto della disomogeneità della matrice carnea, in fase di triturazione e impasto. A tale proposito, tenendo in considerazione le variabili naturali del sistema alimentare in oggetto, come composizione e qualità, il modello può essere utilizzato per studiare l'unione del sale con l'impasto di carne.



## ***PARTE SPERIMENTALE***



# CAPITOLO 4. MATERIALI E METODI

## 4.1 Organizzazione generale del lavoro

La diffusione dell'acqua all'interno di un prodotto insaccato e stagionato a base di carne è sicuramente un aspetto di principale importanza per quanto riguarda la qualità del prodotto finale.

A tale proposito il seguente lavoro si propone di mettere a punto dei modelli numerici in grado di descrivere i fenomeni diffusivi che interessano l'interno di un salame, durante le fasi di maturazione e conservazione.

Per ottenere un modello accurato è necessario poter descrivere nel modo più realistico possibile i materiali coinvolti, quindi è stato necessario definire il coefficiente di diffusione dell'acqua all'interno dell'insaccato. A tale scopo, la prima parte del lavoro riguarda la messa a punto di un metodo inverso per la misura dei coefficienti diffusivi, basato sulla comparazione tra valori di concentrazione di acqua nel salame determinati sperimentalmente (in condizioni che rendono particolarmente semplice la misura) e numericamente.

Successivamente è stato realizzato un modello in grado di descrivere sia i fenomeni diffusivi che avvengono all'interno del salame che i fenomeni di scambio che coinvolgono la superficie dell'insaccato e l'ambiente, durante diversi periodi di maturazione.

Successivamente alla maturazione, i salami vengono conservati in confezioni impermeabili, di conseguenza è stato realizzato un ulteriore modello in grado di descrivere sia i fenomeni diffusivi che si osservano all'interno del salame, sia i fenomeni di evaporazione e condensazione tra la superficie del salame e l'aria presente nella confezione. Tali fenomeni sono governati principalmente dagli sbalzi termici a cui sono sottoposti i salami durante la conservazione.

Entrambi i modelli consentono di analizzare l'evoluzione del contenuto di umidità in

maniera puntuale all' interno del salame al variare delle dimensioni dell'insaccato e delle condizioni di maturazione e conservazione (tempo/temperatura).

## **4.2 Determinazione del coefficiente di diffusione tramite metodo inverso**

### I fase

Le prove in oggetto sono state finalizzate alla raccolta sperimentale dei valori di concentrazione di acqua libera ( $\bar{C}_{exp}$ ) in funzione del tempo, in campioni di salame conservati in atmosfera satura di H<sub>2</sub>O.

Le determinazioni sperimentali sono state ottenute considerando un “salame tipo Milano”, imbustato in una confezione di plastica in atmosfera protetta (immagine 9). La sua composizione rappresenta quella di un salame di “puro suino” tipico: carne suina, sale, destrosio, spezie e aromi, antiossidanti: ascorbato di sodio; conservanti: nitrito di sodio e nitrito potassio.



**Immagine 9: Salame impiegato per la sperimentazione.**

Inizialmente è stata determinata l'umidità iniziale del salame tramite metodo in stufa. In particolare sono state impiegate cinque repliche prelevate dalla parte più centrale delle fette di salame e cinque repliche prelevate dalla parte più esterna delle fette di salame (subito sotto il budello di rivestimento).

Successivamente, dalle fette di salame sono stati prelevati cilindretti di campioni,



mediante carotatore, aventi diametro di 8-9 mm e altezza di 10 mm (immagine 10). La forma di un tale campione è semplicemente riproducibile in un modello numerico e le sue dimensioni favoriscono una veloce diffusione dell'acqua in tempi brevi.



**Immagine 10: Campione cilindrico di salame.**

Per poter garantire un tempo sufficientemente alla completa saturazione del materiale e contemporaneamente evitare lo sviluppo di muffe, tali da comprometterne i risultati, particolare cura è stata posta nei confronti della fase di preparazione dei campioni. A tale proposito, il salame è stato spellato prima del taglio delle fette, così da evitare la contaminazione delle fette da parte del budello esterno. Anche in questo caso cinque campioni sono stati prelevati dalla zona più interna delle fette di salame ed altri cinque dalla zona più esterna delle fette (subito sotto il budello di rivestimento), al fine di discriminare una eventuale diversa diffusività dell'acqua nelle due zone. Ciascun campione è stato posto all'interno di un contenitore di vetro a chiusura ermetica contenente un vasetto colmo di acqua distillata utile a saturare l'ambiente di umidità. Tramite una candela è stato creato anaerobiosi all'interno dei contenitori al fine di limitare la crescita di muffe sui campioni di salame.



**Immagine 11: aspetto finale dei campioni.**

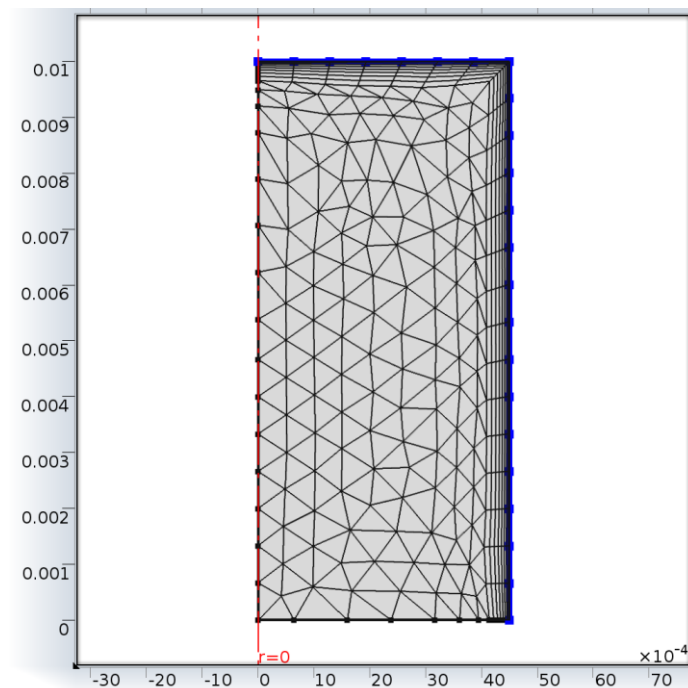
Ciascun barattolo contenente i campioni è stato inserito in ambiente termostato a 15°C. La sperimentazione ha avuto una durata di 27 giorni, durante i quali quotidianamente è stato annotato l'aumento di peso dei campioni dovuto all'assorbimento d'acqua. Ad ogni apertura del barattolo è stata ripristinata la condizione di anaerobiosi, riaccendendo la candela.

## II fase

E' stato sviluppato un modello matematico in grado di riprodurre ciò che è avvenuto nei diversi cilindretti di salame, in grado di stimare un valore di  $H_2O$  libera media ( $\bar{C}_{num}$ ) in funzione del tempo e di un determinato valore del coefficiente di diffusione  $D_{H_2O}$ .

Il modello diffusivo è stato sviluppato utilizzando il software Comsol Multiphysics 4.3 (COMSOL Inc., Burlington, MA). Il modello geometrico utilizzato è bidimensionale assialsimmetrico e rispecchia le dimensioni del campione sperimentale (altezza: 10 mm; diametro: 9 mm).

La mesh utilizzata è costituita da 276 elementi triangolari e 176 elementi quadrilateri disposti vicino alle boundaries, come mostrato in figura 4.



**Figura 4: mesh del modello**

Il fenomeno della diffusione è governato dalle leggi di Fick, secondo cui il flusso di massa è proporzionale al gradiente di concentrazione, tramite il coefficiente di diffusione ( $D_{H_2O}$ ). Quindi il problema è stato descritto tramite la seconda legge di Fick (bidimensionale):

$$\frac{\partial C_{num}}{\partial t} = D_{H_2O} \left( \frac{\partial^2 C_{num}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C_{num}}{\partial y^2} \right)$$

dove  $C_{num}$  è la concentrazione di H<sub>2</sub>O calcolata (mol m<sup>-3</sup>) nella posizione  $x,y$  (m) al tempo  $t$  (s).

Le condizioni iniziali e al contorno utilizzate sono le seguenti:

- concentrazione iniziale di H<sub>2</sub>O disciolta ( $C_{0-num}$ ) uniformemente distribuita, conforme alle determinazioni sperimentali (5000 mol m<sup>-3</sup>);
- coefficiente di diffusione ( $D_{H_2O}$ ) costante ed omogeneo;
- la concentrazione di H<sub>2</sub>O al contorno è stata definita ipotizzando che uno strato esterno di salame (di spessore minimo) si saturi istantaneamente a contatto con l'atmosfera al 100% di H<sub>2</sub>O.

Il valore di saturazione del materiale è stato determinato sperimentalmente ed pari a 57260 molm<sup>-3</sup>.

La concentrazione media di H<sub>2</sub>O disciolta ( $\bar{C}_{num}$ ) al tempo  $t$  (s) è stata determinata integrando nello spazio il valore di  $C_{num}$ .

### III fase

Convergenza tra funzione numerica ( $\bar{C}_{num}$ ) e sperimentale ( $\bar{C}_{exp}$ ) e determinazione del coefficiente di diffusione ( $D_{H_2O}$ ).

Al fine di stimare il coefficiente di diffusione dell'acqua nel salame ( $D_{H_2O}$ ) tramite metodo inverso, è necessario determinare i parametri del modello in modo da far sì che la funzione numerica ( $\bar{C}_{num}$ ) ad avere andamento il più possibile simile a quello della funzione sperimentale ( $\bar{C}_{exp}$ ). Si tratta dunque di un procedimento di parametr estimation, ottenuto per inversione, a tale scopo è stato utilizzato il modulo di

ottimizzazione presente in Comsol Multiphysics 4.3 (COMSOL Inc., Burlington, MA).

L'errore tra il valore ottenuto tramite simulazione e il valore ottenuto sperimentalmente, è stato considerato come una *funzione obiettivo* (OF).

Il valore ottimale di  $D_{H_2O}$  corrisponde al minimo della funzione obiettivo. Per minimizzare la OF il modello è stato combinato con un algoritmo di ottimizzazione globale. In particolare è stato utilizzato il metodo di *Levenberg-Marquardt* basato sul gradiente. Tale metodo minimizza la somma dei quadrati delle distanze tra i dati sperimentali e quelli calcolati tramite modello:

$$OF(D_{H_2O}) = \sum_i [\bar{C}_{\text{exp}}(t_i) - \bar{C}_{\text{num}}(t_i, D)]^2$$

### **4.3 Modello numerico relativo alla fase di maturazione**

Al giorno d'oggi sono disponibili ottimi software commerciali di fluidodinamica computazionale utili alla risoluzione flessibile e simultanea delle equazioni di conservazione dell'energia, della massa e del momento (Scott & Richardson, 1997) parzialmente utilizzati anche nell'ambito dell'ingegneria alimentare (Bin Xia et al. 2002; Fabbri, 2005). Le equazioni riguardanti il trasferimento di massa dell'acqua all'interno del salame durante le fasi di maturazione sono state risolte utilizzando Comsol Multiphysics 4.3 (COMSOL Inc., Burlington, MA, USA), un solutore commerciale di equazioni differenziali alle derivate parziali basato sulla tecnica degli elementi finiti. È stato scelto il risolutore MUMPS (MULTifrontal Massively Parallel Solver), che è attualmente uno dei più stabili e veloci per la risoluzione di sistemi lineari di grandi dimensioni.

Il modello tiene conto dei fenomeni diffusivi che avvengono all'interno del salame e dei fenomeni di scambio che si instaurano tra prodotto ed ambiente di maturazione.

La geometria del modello è parametrica, in modo da poter variare in maniera semplice le dimensioni del salame. Ciò permette eventualmente di ottenere delle curve tempo-concentrazione di acqua all'interno del prodotto in funzione delle caratteristiche dimensionali e costitutive di uno stesso prodotto.

Con lo scopo di limitare il tempo di calcolo, si è deciso di costruire un modello monodimensionale, tuttavia con una semplice operazione, è possibile visualizzare il modello bidimensionale. Infatti, essendo la geometria del salame assialsimmetrica, il modello 2D può essere facilmente generato dalla rivoluzione del profilo del salame attorno all'asse longitudinale. Le dimensioni della geometria del modello rispecchiano quelle reali del salame considerato (raggio: 10 mm, lunghezza: 200 mm). Per ottenere un modello accurato bisogna descrivere nel modo più realistico possibile i materiali coinvolti. In questo lavoro è stato quindi necessario descrivere in modo affidabile le proprietà fisiche diffusive del materiale. Il valore del coefficiente di diffusione della H<sub>2</sub>O è stato determinato precedentemente tramite metodo inverso

(paragrafo precedente).

### *Equazioni di governo e condizioni al contorno*

Il fenomeno della diffusione è governato dalle leggi di Fick secondo cui il flusso di massa è proporzionale al gradiente di concentrazione tramite il coefficiente di diffusione ( $D_{H_2O}$ ). Quindi il problema è stato descritto tramite la seconda legge di Fick monodimensionale:

$$\frac{\partial C_{num}}{\partial t} = D_{H_2O} \left( \frac{\partial^2 C_{num}}{\partial x^2} \right)$$

dove  $C$  è la concentrazione puntuale di  $H_2O$  ( $\text{mol m}^{-3}$ ) presente nel salame al tempo  $t$  (s).

Le condizioni iniziali e al contorno utilizzate sono le seguenti:

- concentrazione iniziale su base secca di  $H_2O$  uniformemente distribuita e definita come:

$$C_{in} = \left( \frac{M_{H_2O}}{PM_{H_2O} \cdot V_s} \right) \rightarrow C_{in} = \left( \frac{X_{in} \cdot \rho_s}{PM_{H_2O}} \right)$$

dove  $X_{in}$  è il titolo iniziale di acqua presente nel salame su base secca (determinato sperimentalmente: 1.14 kg/kg),  $\rho_s$  la densità del salame determinato sperimentalmente ( $600 \text{ kgm}^{-3}$ ), mentre  $PM_{H_2O}$  è il peso molecolare dell'acqua.

- come condizione al contorno viene impostata una condizione di *flusso* di acqua verso l'esterno regolata dalla seguente equazione:

$$N = k_{ex} (C_{bound} - C)$$

dove  $N$  [ $\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ] è il flusso,  $k_{ex}$  [ $\text{ms}^{-1}$ ] è il coefficiente di scambio tra solido e strato di solido saturo all'equilibrio con l'ambiente,  $C_{bound}$  è la concentrazione di  $\text{H}_2\text{O}$  del solido all'equilibrio con l'aria.

Per quanto riguarda il coefficiente di scambio ( $k_{ex}$ :  $1\text{E-}6 \text{ ms}^{-1}$ ), si è deciso di utilizzare un valore così piccolo da non riportare problemi di convergenza. Tale coefficiente può variare entro amplissimi limiti, senza problemi di fedeltà fisica del modello: per valori eccessivamente elevati potrebbe essere pregiudicata la convergenza, mentre valori molto piccoli potrebbero introdurre una resistenza artificiale al passaggio dell'umidità. Il valore va dunque determinato empiricamente scegliendo un livello poco inferiore di quello che determina problemi di convergenza. Il valore della concentrazione all'equilibrio tra solido ed aria è stato determinato secondo la seguente equazione:

$$C_{bound} = \left( \frac{X_{bound} \cdot \rho_s}{PM_{H_2O}} \right)$$

dove  $X_{bound}$  è il titolo di acqua all'equilibrio tra solido ed aria su base secca.

Il titolo all'equilibrio  $X_{bound}$  è stato determinato utilizzando la legge di Oswin:

$$X_{bound} = A \left[ \frac{a_w}{(1 - a_w)} \right]^B$$

dove  $a_w$  è il grado igrometrico dell'aria (umidità ambiente), mentre A e B sono due parametri che vengono estrapolati fittando le isoterme di assorbimento con la legge di Oswin. Nel presente studio sono stati utilizzati i valori ricavati fittando le isoterme di assorbimento determinate su un prodotto insaccato simile al salame a differenti temperature e riportate da (Palatoglu et al. 2001):

$$A = 129028 \exp^{-0.033T}$$

$$B = 0.1199 \exp^{0.0053T}$$

essendo  $T$  la temperatura [K].

La validazione del modello è avvenuta confrontando l'andamento dei valori relativi al titolo di acqua su base secca determinati numericamente e sperimentalmente su salami maturati 12 e 24 giorni in un ambiente al 75%.

#### **4.4 Modello numerico relativo alla fase di conservazione in confezione impermeabile**

Per la messa a punto del modello riguardante la fase di conservazione del salame in confezioni impermeabili, è stato utilizzato lo stesso software, la stessa geometria e gli stessi parametri fisici del salame ( $D_{H_2O}$ ) utilizzati per il modello riguardante la maturazione.

Il modello tiene conto dei fenomeni diffusivi che intervengono all'interno del salame e dei fenomeni di scambio (evaporazione e condensazione) che si instaurano tra prodotto ed aria presente nella confezione. Essendo un sistema chiuso, la quantità d'acqua totale presente nel sistema salame/aria è da considerarsi costante.

Anche in questo caso il modello è stato costruito in maniera parametrica, permettendo di ottenere delle curve tempo-concentrazione di acqua all'interno del prodotto in funzione delle dimensioni del prodotti, della confezione e della variazione di temperatura durante la conservazione.

##### *Equazioni di governo e condizioni al contorno*

Anche in questo caso il fenomeno della diffusione è governato dalla legge di Fick secondo cui il flusso di una massa è proporzionale al gradiente di concentrazione tramite il coefficiente di diffusione ( $D_{H_2O}$ ).



Le condizioni iniziali e al contorno utilizzate sono le seguenti:

- concentrazione iniziale di H<sub>2</sub>O uniformemente distribuita e definita come:

$$C_{in} = \left( \frac{M_{H_2O}}{PM_{H_2O} \cdot V_s} \right) \rightarrow C_{in} = \left( \frac{X_{in} \cdot \rho_s}{PM_{H_2O}} \right)$$

dove  $X_{in}$  è il titolo iniziale di acqua presente nel salame su base secca prima del confezionamento (determinato sperimentalmente: 0.80 kg/kg),  $\rho_s$  la densità del salame disidratato (determinata sperimentalmente: 600 kgm<sup>-3</sup>), mentre  $PM_{H_2O}$  è il peso molecolare dell'acqua.

Come condizione al contorno viene impostata una condizione di *flusso* di acqua verso l'esterno che in questo caso viene definita in funzione delle pressioni parziali e tiene conto anche dei fenomeni di evaporazione e condensazione che si instaurano tra aria e superficie del salame:

$$N = k_{ex} (\varphi_{air} - aw_{air})$$

dove  $N$  [molm<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>] è il flusso,  $k_{ex}$  [ms<sup>-1</sup>] è il coefficiente di scambio tra solido ed aria (uguale a quello utilizzato per il modello di maturazione) e  $\varphi_{air}$  è il grado igrometrico della miscela aria/vapor d'acqua e  $aw_{air}$  il grado igrometrico dell'aria vicino al solido (o attività dell'acqua).

Siccome il software utilizzato impone che il flusso sia definito in funzione delle concentrazioni è necessario riportare le concentrazioni in relazione alle pressioni parziali (o grado igrometrico) essendo:

$$C = \left( \frac{X \cdot \rho_{air}}{PM_{H_2O}} \right)$$

$$X = \left( \frac{PM_{H2O}}{PM_{air}} \right) \cdot \left( \frac{\varphi_{air} \cdot P_{airSat}}{P_{atm} - \varphi_{air} \cdot P_{airSat}} \right)$$

Quindi sostituendo nell'equazione del flusso le pressioni parziali con la precedente espressione della concentrazione, si ottiene:

$$N = k_{ex} \left( \frac{\rho_{air}}{PM_{H2O}} \right) \cdot \left( \frac{PM_{H2O}}{PM_{air}} \right) \cdot \left( \frac{\varphi_{air} \cdot P_{airSat}}{P_{atm} - \varphi_{air} \cdot P_{airSat}} \right) - \left( \frac{aw_{air} \cdot P_{airSat}}{P_{atm} - aw_{air} \cdot P_{airSat}} \right)$$

dove:

$$\rho_{air} = \left( \frac{P_{atm} \cdot PM_{air}}{RT} \right) : \text{densità dell'aria [kgm}^{-3}\text{];}$$

$P_{atm}$  : pressione atmosferica [1E+5 Pa];

$PM_{air}$  : peso molecolare dell'aria [28.84 gmol<sup>-1</sup>];

$R$  : costante dei gas perfetti [8.314 JK<sup>-1</sup>mo<sup>-1</sup>];

$T$  : temperatura [K];

$PM_{H2O}$  : peso molecolare dell'acqua [18 gmol<sup>-1</sup>];

$$P_{airSat} = \left( 10^{\left( \frac{8.07131 - \frac{173063}{233426+T}}{760} \right)} \cdot \frac{P_{atm}}{760} \right) : \text{pressione di saturazione del vapor d'acqua in}$$

aria in funzione della temperatura (equazione di August-Antoine, 1888) [Pa];

$$\varphi_{air} = \frac{P_{air}}{P_{airSat}} : \text{grado igrometrico della miscela aria /vapor d'acqua;}$$

$$P_{air} = \frac{M_{H2Oair} \cdot RT}{PM_{H2O} \cdot V_{air}} : \text{pressione parziale vapor d'acqua in aria [Pa];}$$

$V_{air}$ : volume spazio di testa [m<sup>3</sup>];

$M_{H2Oair} = (M_{Tot} - M_{H2OS} - M_{Lq})$ : massa di acqua in aria [g] calcolata considerando il principio di conservazione della massa (il sistema salame/aria è

chiuso);

$M_{Tot} = M_s \cdot X_{H_2Oin}$ : massa totale di acqua presente nel sistema salame/aria[g];

$M_s = V_s \cdot \rho_s$ : massa del salame [g];

$V_s = (r^2 \pi L)$ : volume salame ( $r$ : raggio salame,  $L$ :lunghezza salame) [m<sup>3</sup>];

$\rho_s$ : densità del salame [kgm<sup>-3</sup>];

$X_{H_2Oin}$ : titolo iniziale dell' acqua nel salame su base secca (sperimentale);

$M_{H_2OS} = (\bar{\rho}_{H_2OS} \cdot V_s)$ : massa acqua nel salame [g];

$\bar{\rho}_{H_2OS} = \bar{C} \cdot PM_{H_2O}$ : densità media dell'acqua nel salame in funzione della concentrazione media ( $\bar{C}$ ) di acqua presente in ogni istante [kgm<sup>-3</sup>];

$\frac{dM_{Lq}}{dt} = Fc - Fe$ : conservazione della massa di acqua disponibile in ogni istante e

dipendente dalla portata in massa di acqua che evapora e condensa [g];

$Fc = Kc \cdot (\varphi_{air} - 1) \cdot \left( \frac{M_{H_2Oair}}{M_{Tot}} \right) \cdot \bar{A}$ : portata in massa dell'acqua che condensa

(condizione che viene attivata quando il grado igrometrico della miscela aria/vapor d'acqua è uguale o maggiore ad 1) [kgs<sup>-1</sup>];

$Fe = Ke \cdot (1 - \varphi_{air}) \cdot \left( \frac{M_{Lq}}{M_{Tot}} \right) \cdot \bar{A}$ : portata in massa dell'acqua che evapora (condizione

che viene attivata quando il grado igrometrico della miscela aria/vapor d'acqua è minore di 1) [kgs<sup>-1</sup>];

$\bar{A} = L \pi \cdot (r + r_c)$ : superficie media di scambio ( $L$ :lunghezza salame,  $r$ : raggio salame,  $r_c$ :raggio confezione;

$Kc$ : costante che regola lo scambio per condensazione[1E-3 kgs<sup>-1</sup>m<sup>-2</sup>];

$Ke$ : costante che regola lo scambio per evaporazione [1E-3 kgs<sup>-1</sup>m<sup>-2</sup>];

$$aw_{air} = \left( \frac{\left( \frac{X_{H2OS}}{A} \right)^{\left( \frac{1}{B} \right)}}{1 - \left( \frac{X_{H2OS}}{A} \right)^{\left( \frac{1}{B} \right)}} \right): \text{ il grado igrometrico dell'aria vicino al solido}$$

determinato utilizzando la legge di Oswin:

$X_{H2OS} = \left( \frac{\bar{C}_c \cdot PM_{H2O}}{\rho_s} \right)$ : titolo dell'acqua sulla superficie del salame in funzione della concentrazione media di acqua presente sulla superficie di scambio ( $\bar{C}_c$ ) ad ogni istante.

La validazione del modello è avvenuta confrontando l'andamento dei valori di titolo di acqua su base secca determinati numericamente e sperimentalmente su salami stagionati per 56 giorni a temperatura ambiente.

## CAPITOLO 5. RISULTATI

### 5.1 Determinazione del coefficiente di diffusione tramite metodo inverso

Nel grafico 1 sono riportati i valori medi del contenuto di umidità (%), in funzione del tempo, determinati sperimentalmente sui cilindretti di salame provenienti dalla zona centrale e più esterna del salame. E' possibile osservare che, in entrambi i casi, l'incremento di umidità è descritto da una funzione polinomiale di secondo ordine ( $R^2=0.997$  e  $0.998$ ). La diminuzione della pendenza della curva evidenzia un avvicinamento alla condizione di saturazione del solido. In generale, come ci si poteva aspettare, la parte più interna del salame riporta valori più elevati di umidità. I valori di umidità sono stati convertiti in  $\text{molim}^{-3}$  ed utilizzati per la determinazione del coefficiente di diffusione tramite metodo inverso.

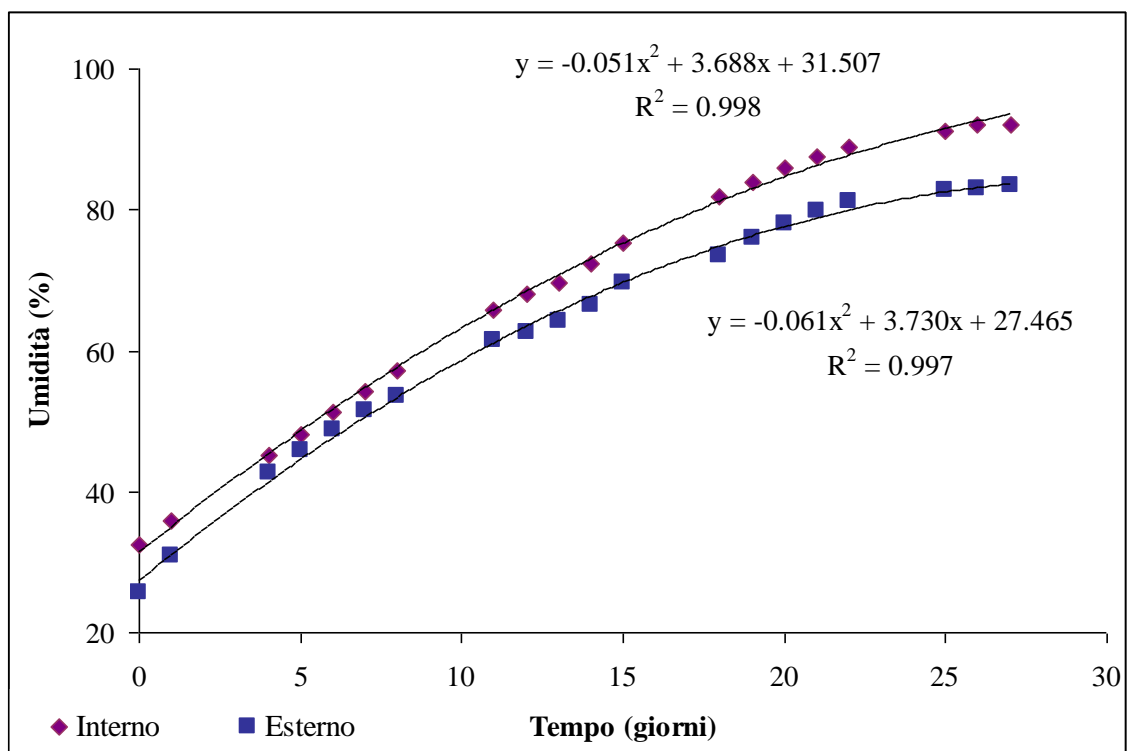
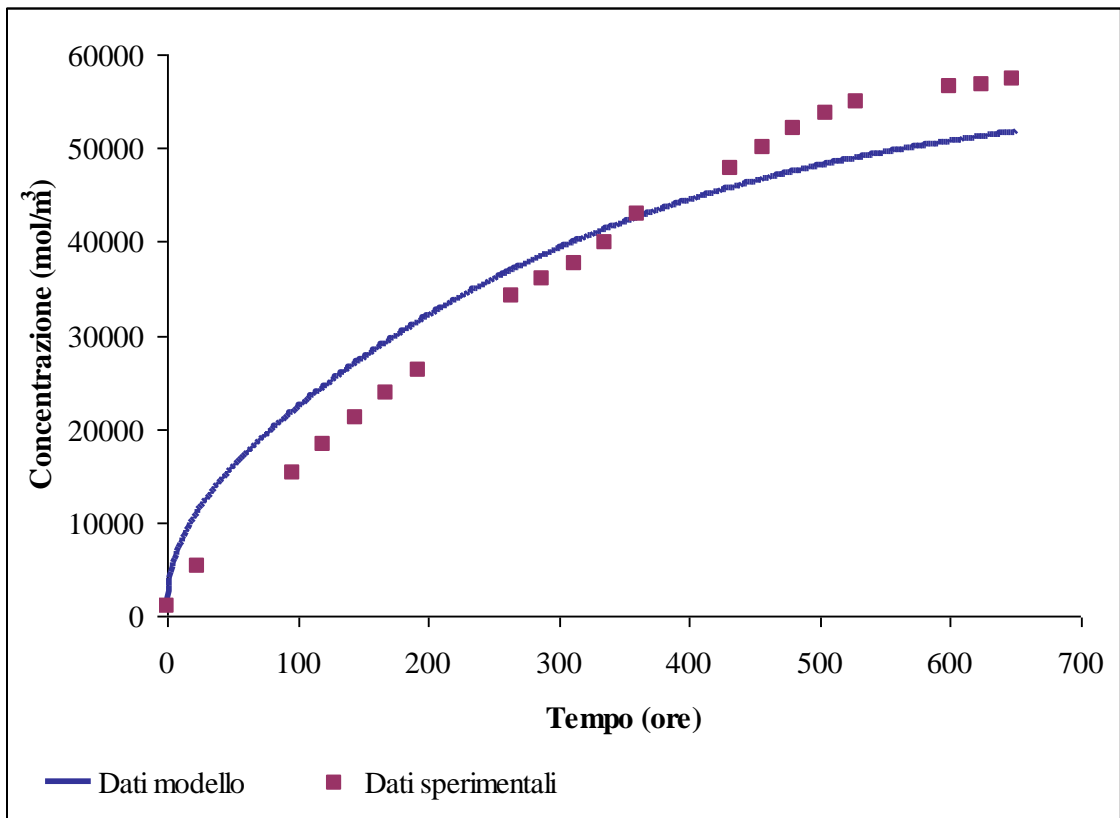


Grafico 1: valori medi del contenuto di umidità determinati sperimentalmente.

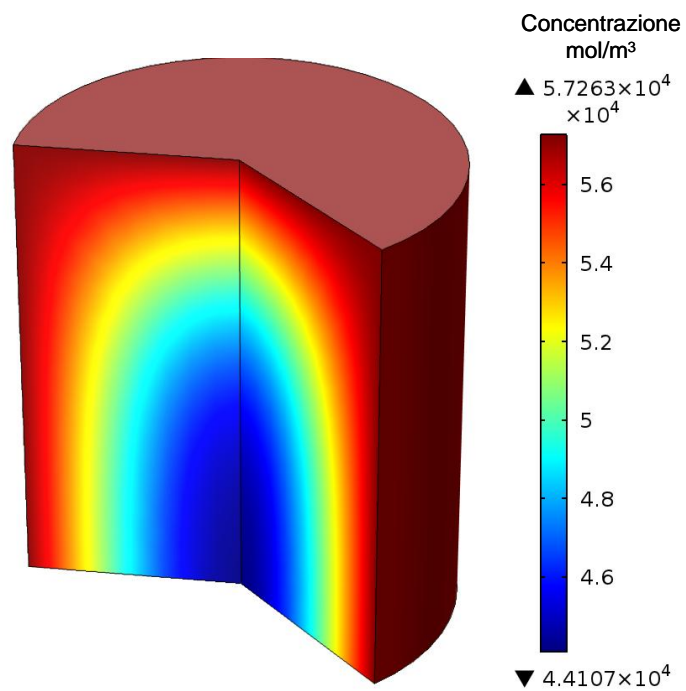
Il coefficienti di diffusione ( $D_{H_2O}$ ) determinato tramite metodo inverso iterativo ed utilizzato successivamente per caratterizzare i materiali del modello di maturazione e conservazione è pari  $2.862E-12 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ . Tale valore è confrontabile con i coefficienti di diffusione riportati in letteratura, relativi a prodotti a base di carne. Tuttavia non sono presenti in letteratura valori relativi a prodotti insaccati simili al salame. Kondjoyan et al., 2006 propongono un valore di D pari a  $5.6E-11 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$  per carne di manzo magra, mentre Trujillo et al., 2007, sempre in relazione a carne di manzo, riportano un valore di D che varia da  $1.29E-11$  a  $2.19E-11 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ . Per quanto riguarda la carne lavorata, Simal et al. (2003) propone un coefficiente di diffusione uguale a  $1.07 E-11 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ , per un prodotto tritato a base di carne magra. Tutti i valori sopra riportati risultano leggermente maggiori rispetto al valore del coefficiente di diffusione determinato in questo studio, una spiegazione potrebbe risiedere nel fatto che la grande quantità di grasso presente nel salame potrebbe rallentare la diffusione dell'acqua all'interno del prodotto.

Nel grafico 2 sono riportati gli andamenti della concentrazione di acqua nel salame determinata sperimentalmente e tramite modello con il valore misurato del coefficiente di diffusione. E' possibile osservare che grazie all'ottimizzazione di D, le due curve risultano essere molto simili. La convergenza ad una soluzione stabile in un tempo dell'ordine di qualche minuto che, confrontato con il tempo necessario per la preparazione dei campioni, l'esecuzione delle misure e l'analisi dei risultati secondo il procedimento tradizionale, è verosimilmente trascurabile

In figura 5, a livello di esempio, viene riportata un'immagine del profilo della concentrazione di acqua all'interno del salame che è possibile ottenere tramite il modello.



**Grafico 2: andamento della concentrazione di acqua nel salame determinata sperimentalmente e tramite modello.**



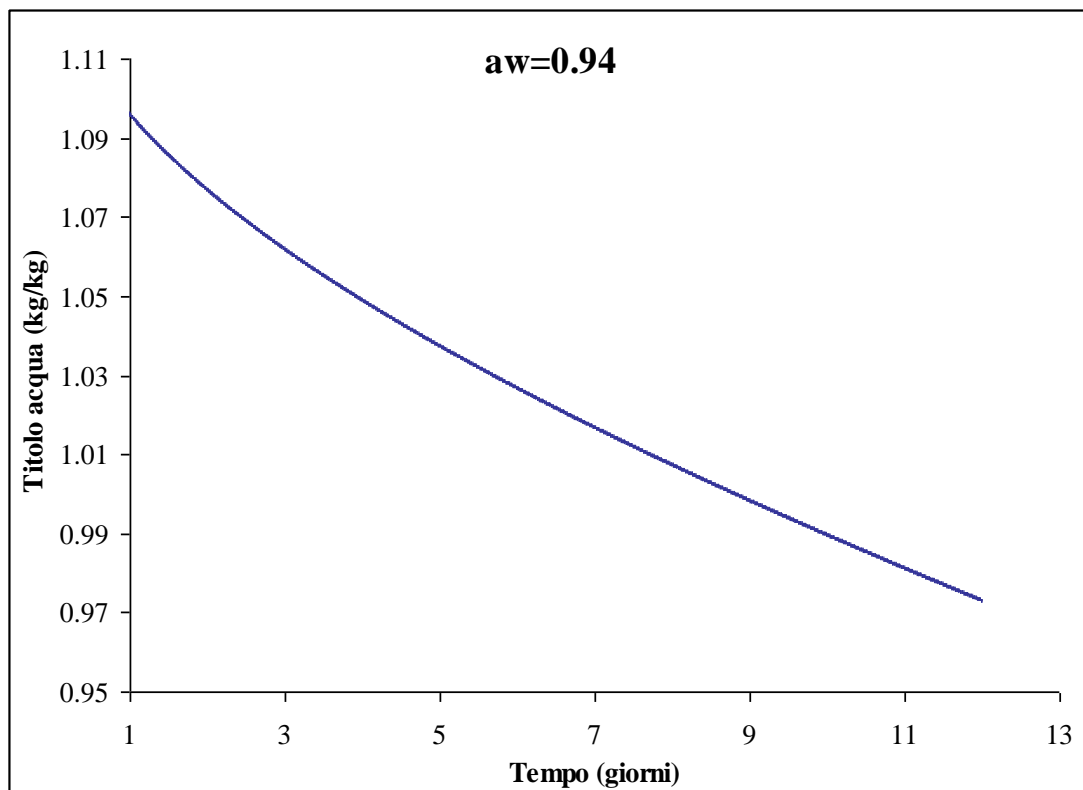
**Figura 5: profilo della concentrazione di acqua all'interno di un cilindretto di salame.**

## 5.2 Modello maturazione

Inizialmente il modello è stato validato al fine di verificare la sua attendibilità. In particolare sono stati confrontati i valori sperimentali, ed ottenuti tramite modello del titolo medio di acqua dopo 12 ( $a_w=0.94$ ) e 24 ( $a_w=0.90$ ) giorni di maturazione in ambiente al 75% di umidità. Nel primo caso sperimentalmente è stato ottenuto un titolo pari a 0.97, mentre nel secondo caso pari a 0.84. Nei grafici 3 e 4 vengono riportati gli andamenti del titolo determinati tramite modello, ed è possibile osservare che, dopo 12 giorni di maturazione, il valore del titolo di acqua è prossimo a 0.97, mentre dopo 24 giorni, è molto vicino a 0.84.

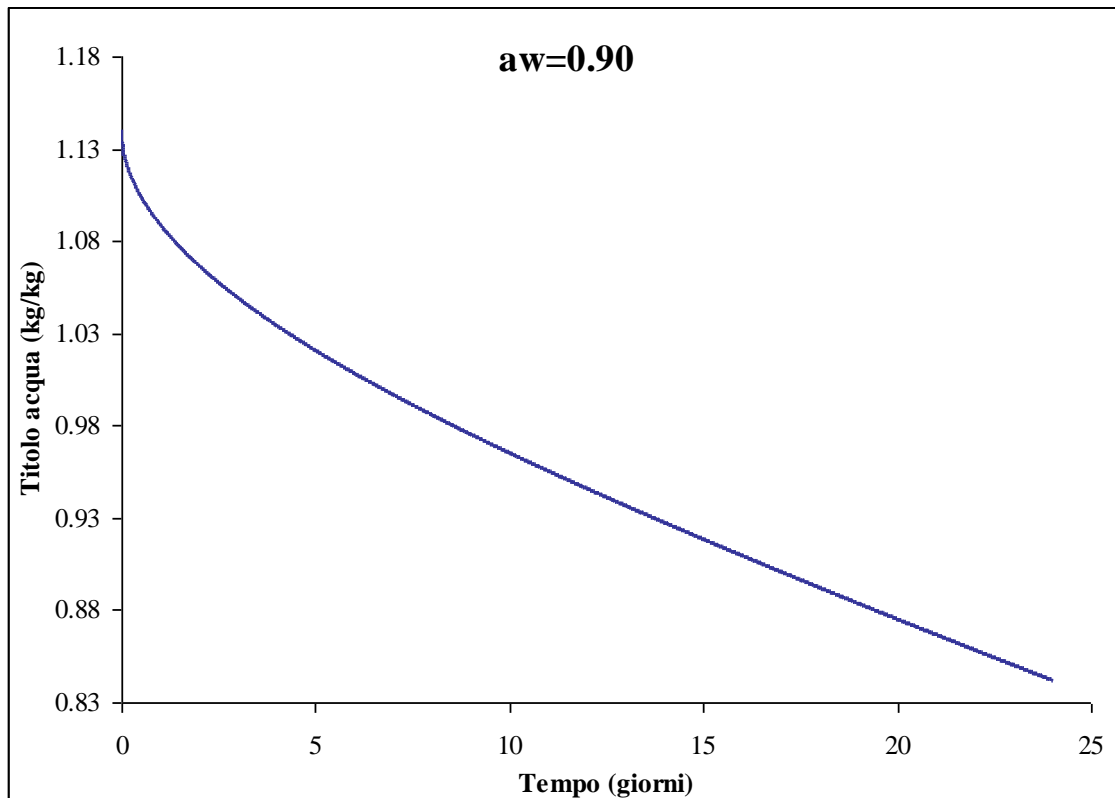
Tale risultato dimostra che il modello numerico è in grado di riprodurre il fenomeno fisico reale della diffusione dell'acqua all'interno dell'insaccato.

L'esito positivo della validazione consente di poter utilizzare il modello per valutare l'effetto di variazioni relative, ad esempio, alla geometria del salame, ed all'ambiente di maturazione (temperatura e umidità).



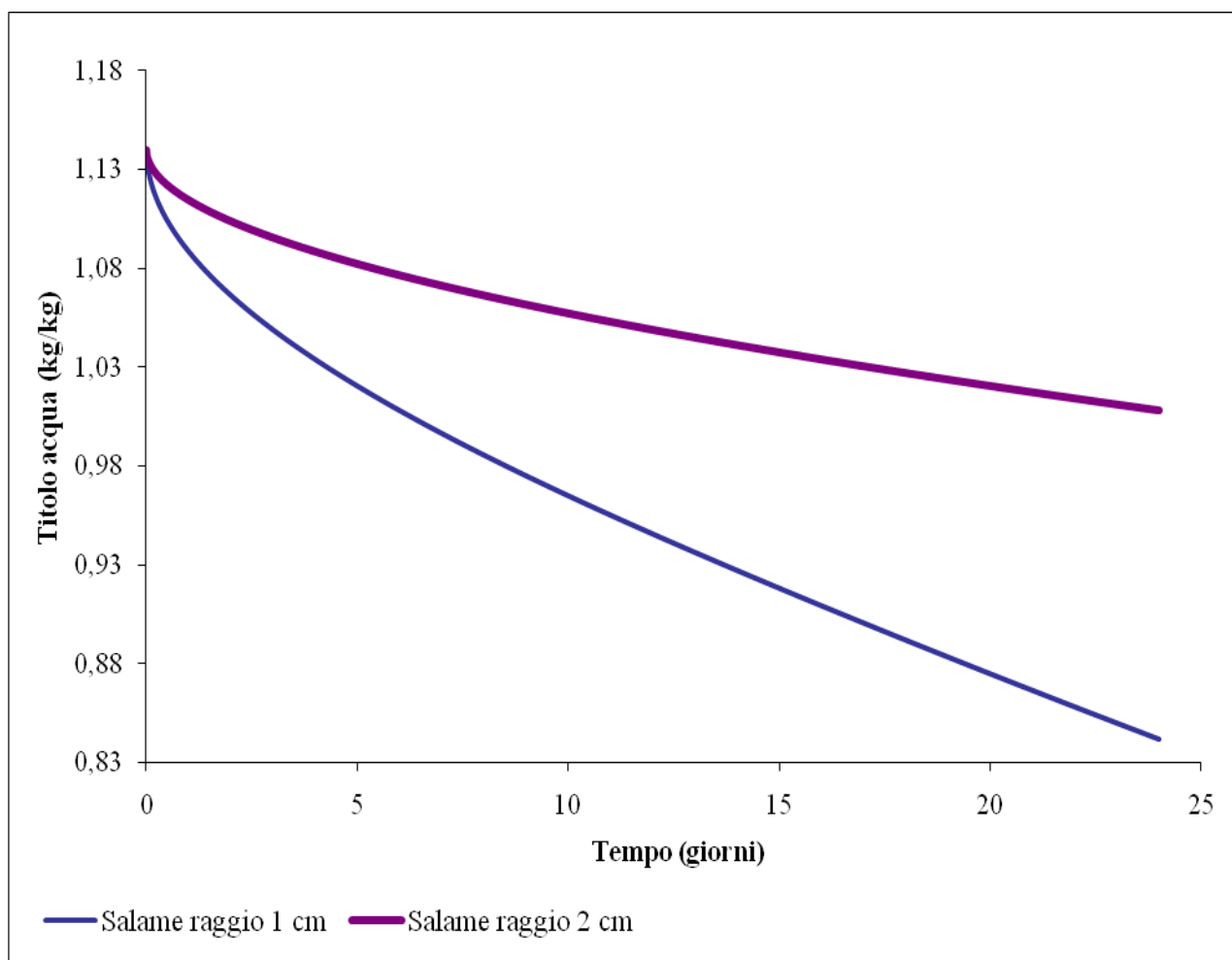
**Grafico 3: andamento del titolo di acqua determinato tramite modello durante 12 giorni di maturazione ( $a_w=0.94$ ).**





**Grafico 4: andamento del titolo di acqua determinato tramite modello durante 24 giorni di maturazione ( $a_w=0.90$ ).**

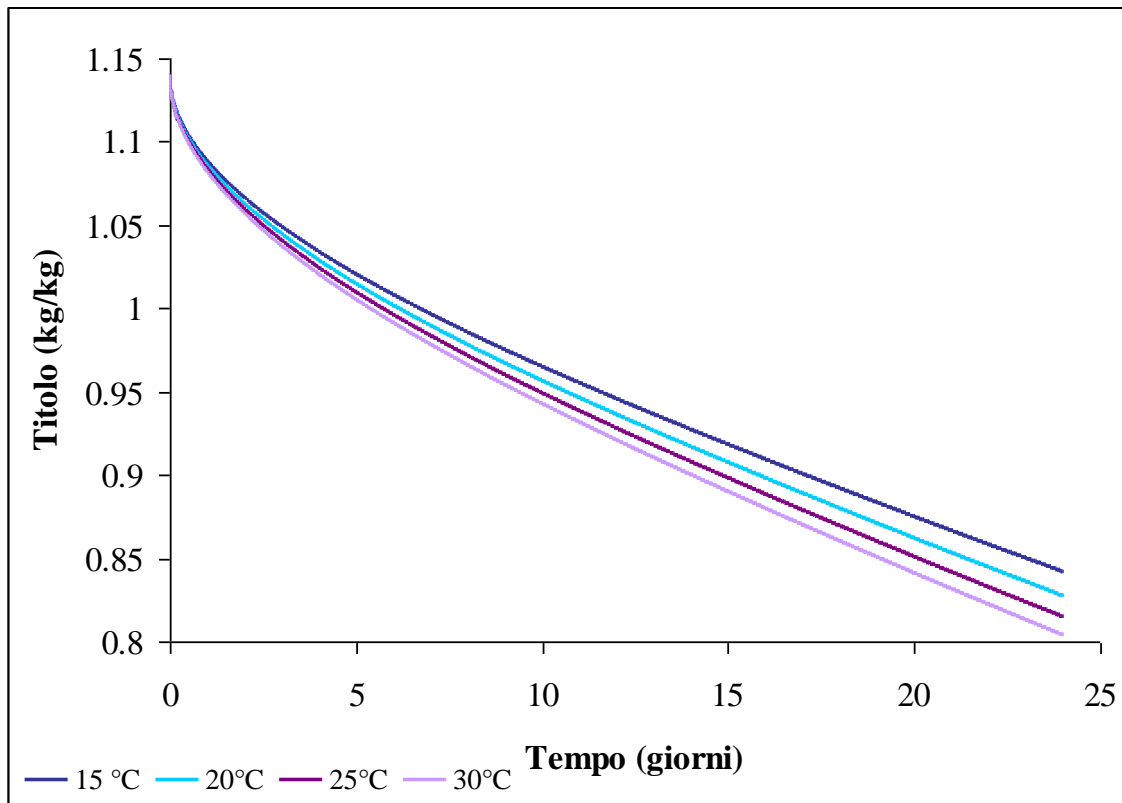
Per valutare l'effetto delle dimensioni dell'insaccato sulla diffusione dell'acqua all'interno del salame, nel grafico 5 vengono riportati gli andamenti del titolo medio di acqua, determinati numericamente, per un salame avente raggio 1 e 2 cm. In particolare è stato considerata una maturazione di 24 giorni utile al raggiungimento di un'attività dell'acqua di 0.90. E' possibile osservare che le dimensioni del salame influenzano notevolmente la diffusione dell'acqua, l'aumento del raggio limita nettamente la diminuzione del titolo, infatti a parità di tempo di maturazione, si osserva una differenza di circa 0.2 punti tra i due salami. Tale analisi mette in luce come la valutazione delle dimensioni di un insaccato sia un aspetto di fondamentale importanza per la fase di maturazione in quanto, anche piccole variazioni del raggio, potrebbero influenzare la qualità del prodotto finale, soprattutto in termini di umidità.



**Grafico 5: andamento del titolo di acqua determinato tramite modello al variare del raggio del salame nei giorni di maturazione.**

Per valutare l'effetto della temperatura degli ambienti di maturazione sulla diffusione dell'acqua all'interno del salame, nel grafico 6 vengono riportati gli andamenti del titolo medio di acqua, determinati numericamente per diverse temperature di maturazione (15-20-25-30°C). Anche in questo caso è stata considerata una maturazione di 24 giorni utile al raggiungimento di un'attività dell'acqua di 0.90.

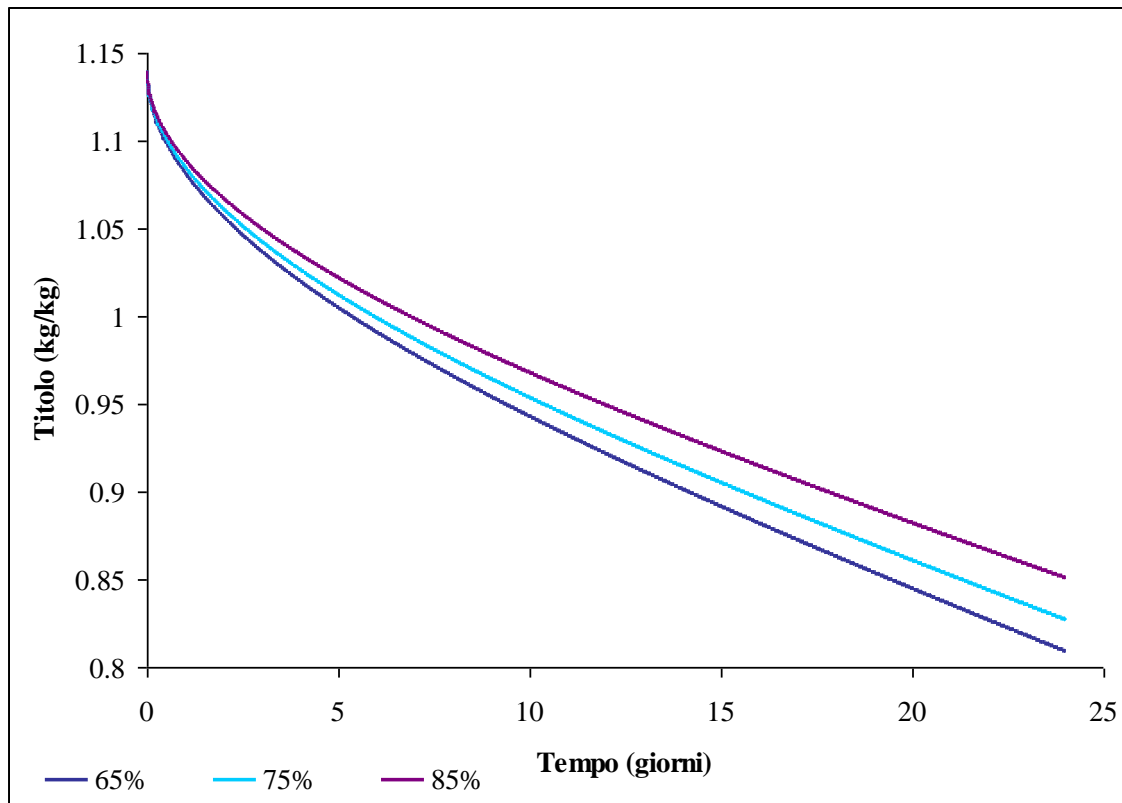
E' possibile osservare che la temperatura influenza in maniera limitata la diffusione dell'acqua all'interno dell'insaccato, infatti a parità di tempo di maturazione, si osserva una differenza molto ridotta tra il titolo che si raggiunge alle diverse temperature. In particolare tra 15 e 30 °C, si manifesta una differenza in titolo di acqua di circa 0.05 punti.



**Grafico 6: andamento del titolo di acqua determinato tramite modello al variare della temperatura e dei giorni di maturazione.**

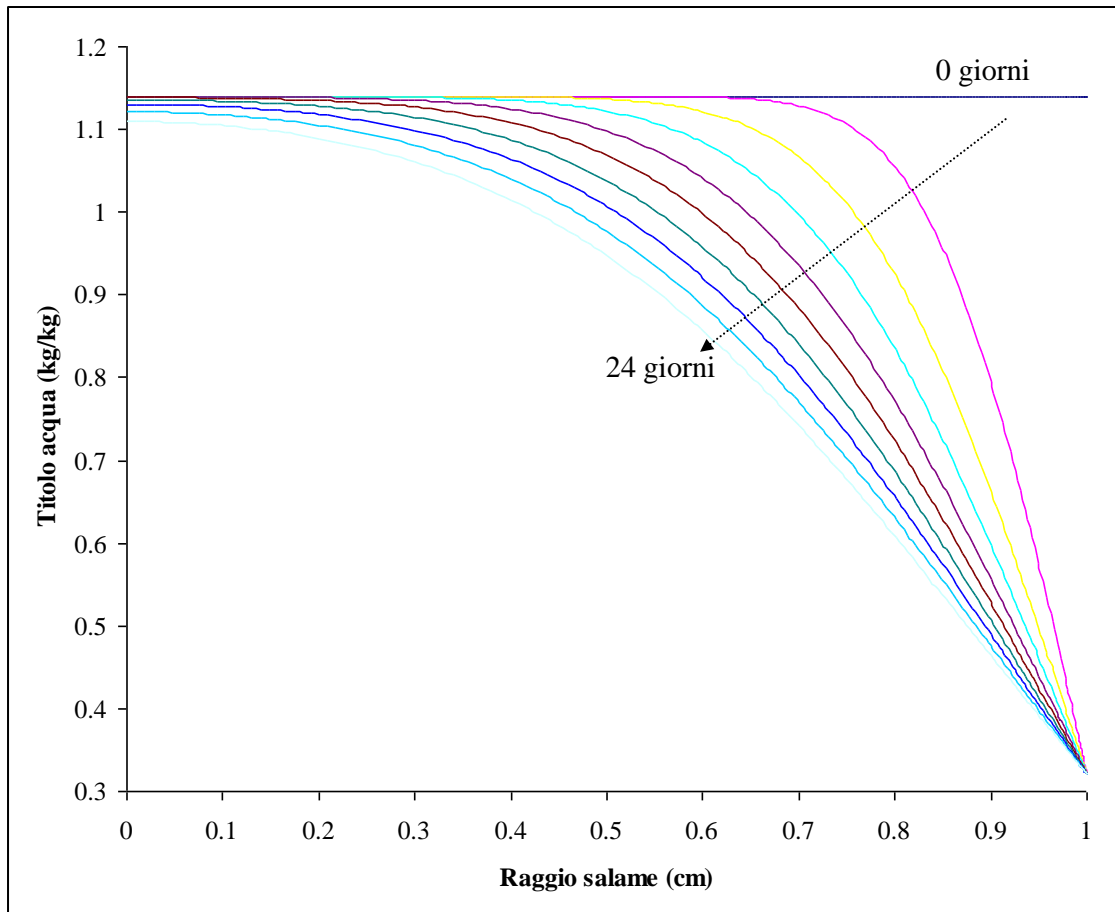
Per valutare l'effetto dell'umidità degli ambienti di maturazione sulla diffusione dell'acqua all'interno del salame, nel grafico 7 vengono riportati gli andamenti del titolo medio di acqua, determinati numericamente, a 65-75 e 85% di umidità. Anche in questo caso è stata considerata una maturazione di 24 giorni utile al raggiungimento di un'attività dell'acqua di circa 0.90.

E' possibile osservare che l'umidità influenza in maniera limitata la diffusione dell'acqua all'interno dell'insaccato, infatti a parità di tempo di maturazione, si osserva una differenza molto ridotta tra il titolo che si raggiunge a differenti umidità. In particolare tra 0.65 e 0.85 % di umidità, si manifesta una differenza in titolo di acqua nel salame di circa 0.05 punti.



**Grafico 7: andamento del titolo di acqua determinato tramite modello al variare dell'umidità dell'ambiente e dei giorni di maturazione.**

Nel grafico 8 vengono riportati gli andamenti del titolo di acqua in funzione del tempo di maturazione (24 giorni) e della posizione lungo il raggio del salame (0=parte più interna, 1= parte più esterna). In questo caso non abbiamo più un valore medio per ogni istante, ma una curva che è utile per capire come l'acqua è distribuita all'interno del salame. Nel cuore dell'insaccato la quantità di acqua tende a rimanere invariata, mentre la superficiale va istantaneamente in equilibrio con l'ambiente circostante che è caratterizzato da un titolo di acqua inferiore (circa 0.3). Con l'avanzare del tempo di conservazione, si osserva una diminuzione del titolo lungo tutto il raggio del salame.

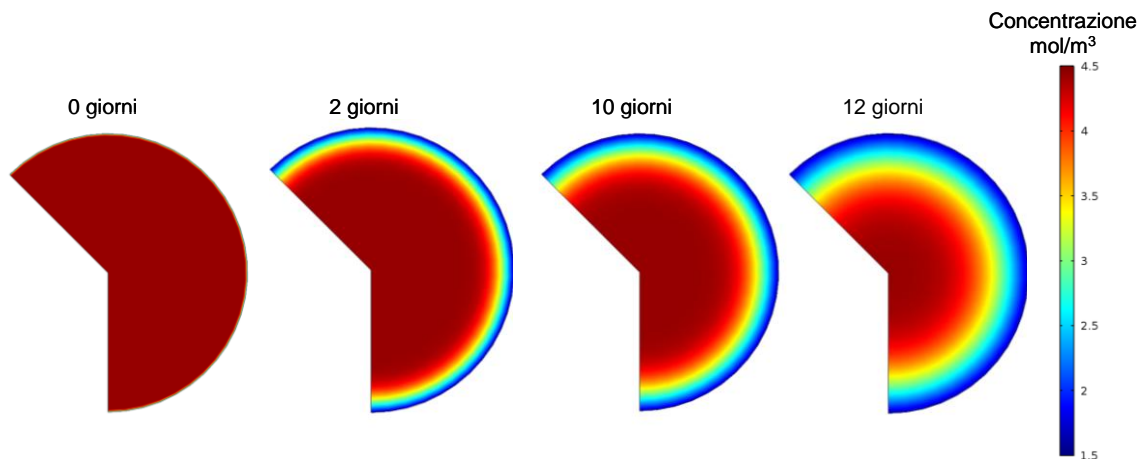


**Grafico 8: andamento del titolo di acqua determinato tramite modello al variare del tempo di maturazione e della posizione lungo il raggio del salame.**

Tramite una rappresentazione grafica dei profili diffusivi che si ottengono con il modello di maturazione, è possibile osservare in maniera diretta e puntuale la concentrazione di acqua all'interno dell'insaccato durante la maturazione. Tale aspetto è pressoché impossibile da valutare sperimentalmente.

In particolare, in figura 6 sono riportati i profili della concentrazione determinati numericamente su un salame avente raggio pari a 1 cm e maturato per 12 giorni. La diminuzione della concentrazione di acqua all'interno dell'insaccato è rappresentata dalla gradazione di colori (da rosso a blu). E' possibile osservare che dopo 12 giorni di maturazione, l'acqua all'interno del salame non è distribuita in maniera uniforme e che tra il centro e la superficie vi è una notevole differenza in termini di  $\text{molm}^{-3}$  di acqua. Infatti la zona più esterna è caratterizzata da una concentrazione di acqua pari

a circa  $15000 \text{ molm}^{-3}$ , mentre la zona più interna da  $45000 \text{ molm}^{-3}$ .



**Figura 6: profili della concentrazione determinati numericamente su un salame avente raggio pari a 1 cm e maturato per 12 giorni ( $a_w=0.94$ ).**

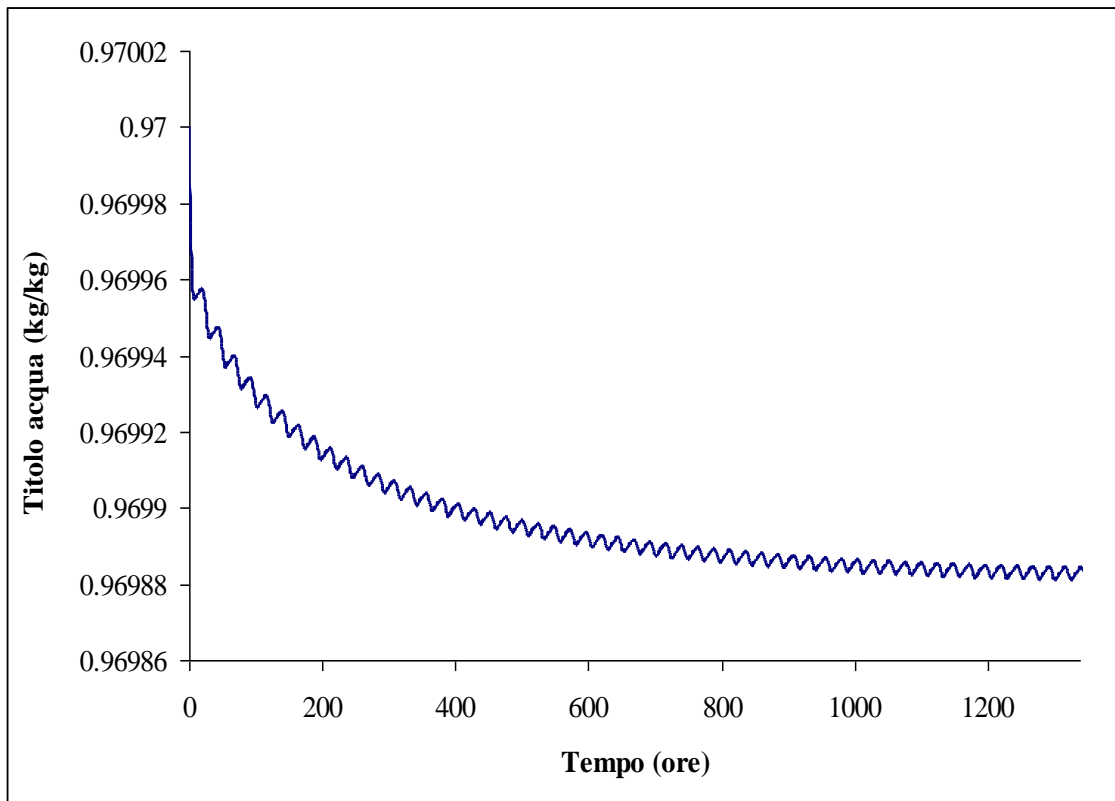
### 5.3 Modello conservazione

Inizialmente il modello è stato validato al fine di verificare la sua attendibilità. In particolare sono stati confrontati i valori sperimentali, ed ottenuti tramite modello del titolo medio di acqua dopo 56 giorni di conservazione in busta impermeabile a temperatura ambiente ( $30^\circ\text{C}$  di giorno e  $20^\circ\text{C}$  di notte). Sperimentalmente è stato ottenuto un titolo leggermente inferiore (0.95) rispetto a quello iniziale (0.97). Nel grafico 9 viene riportato l'andamento del titolo determinato tramite modello, ed è possibile osservare che, dopo 56 giorni di maturazione, il valore del titolo di acqua è diminuito di pochissimo (0.01), come riportato anche dai dati sperimentali. Il valore del titolo compie delle piccole oscillazioni causate dalla variazione di temperatura che genera i fenomeni di condensazione ed evaporazione sulla superficie dell'insaccato. Tale fenomeno è dovuto al fatto che la busta impermeabile rende il sistema chiuso, quindi l'acqua non riesce a diffondere fuori dal salame.

Tale risultato dimostra che il modello numerico è in grado di riprodurre il fenomeno fisico reale della diffusione dell'acqua all'interno dell'insaccato e dei fenomeni di evaporazione e condensazione che si instaurano sulla superficie dello stesso.

L'esito positivo della validazione consente di poter utilizzare il modello per valutare

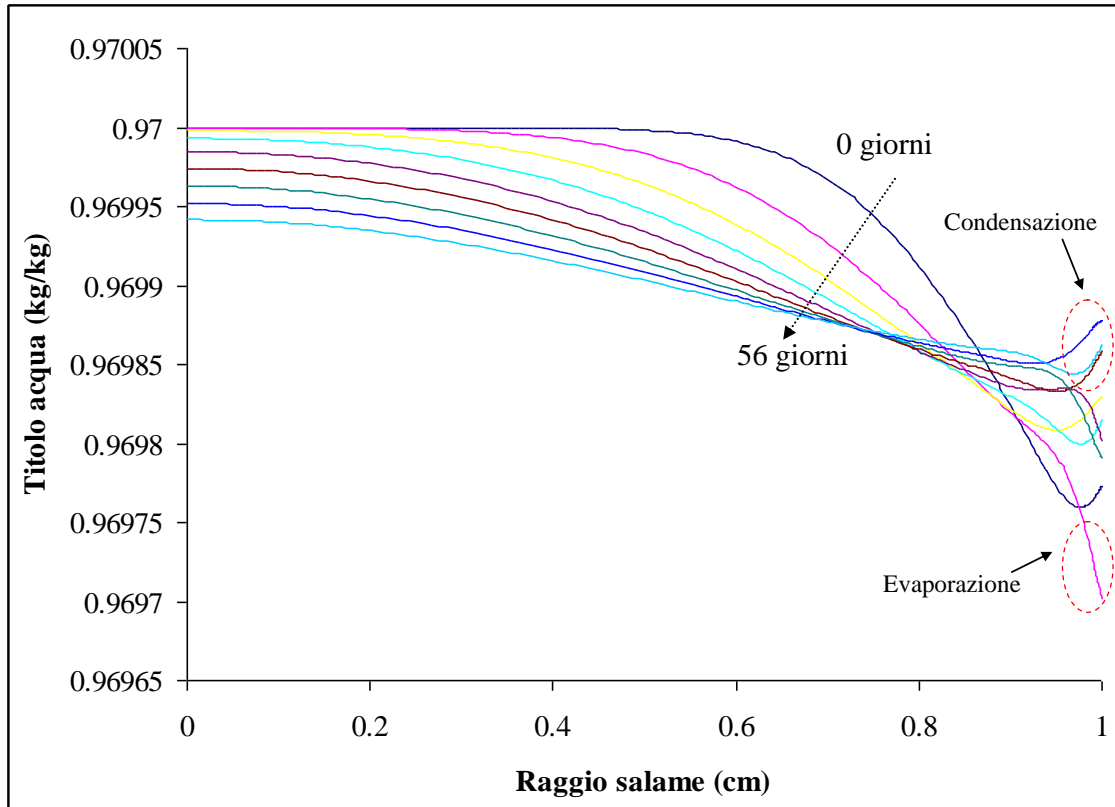
l'effetto di variazioni relative, ad esempio, alla geometria del salame, ed all'ambiente di maturazione (temperatura).



**Grafico 9: andamento del titolo di acqua determinato tramite modello durante 56 giorni di conservazione in confezione impermeabile.**

Nel grafico 10 vengono riportati gli andamenti del titolo di acqua in funzione del tempo di conservazione (56 giorni) e della posizione lungo il raggio del salame (0=parte più interna, 1= parte più esterna). In questo caso non abbiamo più un valore medio per ogni istante, ma una curva che è utile per capire come l'acqua è distribuita all'interno del salame. Come per il precedente grafico, si osserva che la variazione del titolo di acqua all'interno del salame è minima. Nel cuore dell'insaccato la quantità di acqua tende a rimanere pressoché invariata, mentre nella zona superficiale (raggio vicino a 1), si osservano le maggiori variazioni, anche in questo caso dovute ai fenomeni di evaporazione e condensazione. In particolare quando si instaurano fenomeni evaporativi (temperatura ambiente maggiore), il titolo all'interno del salame

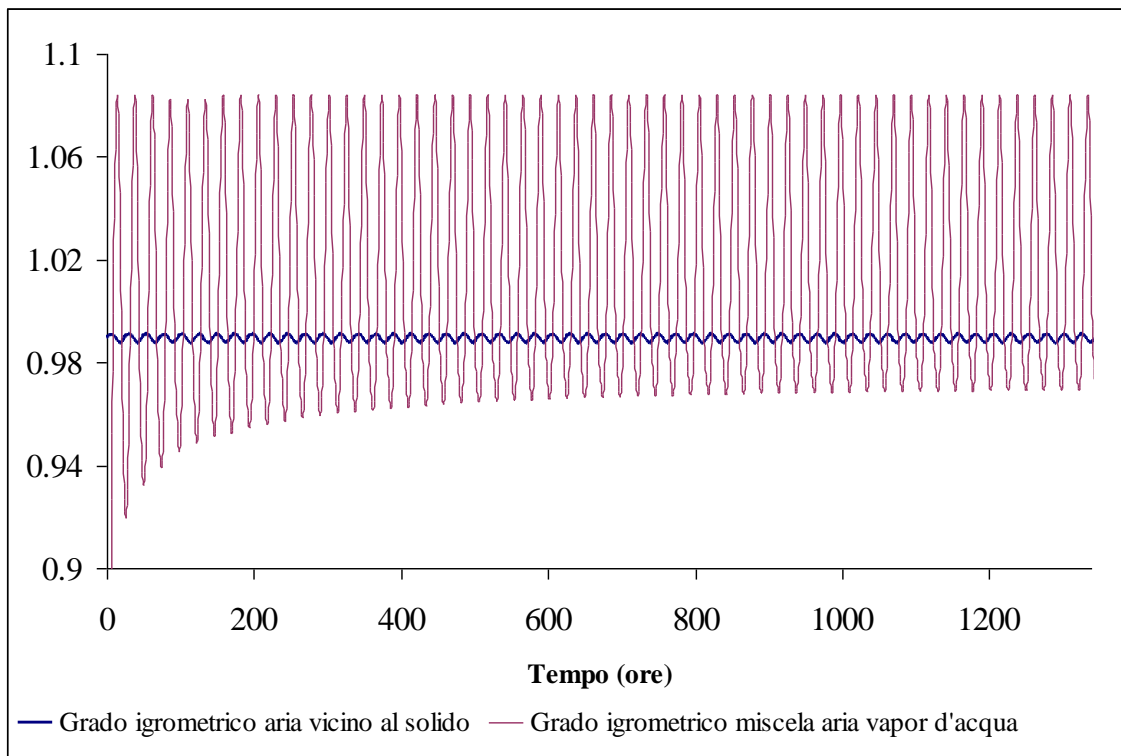
diminuisce, al contrario, quando si manifestano fenomeni di condensazione, il titolo aumenta.



**Grafico 10: andamento del titolo di acqua determinato tramite modello al variare del tempo di conservazione e della posizione lungo il raggio del salame.**

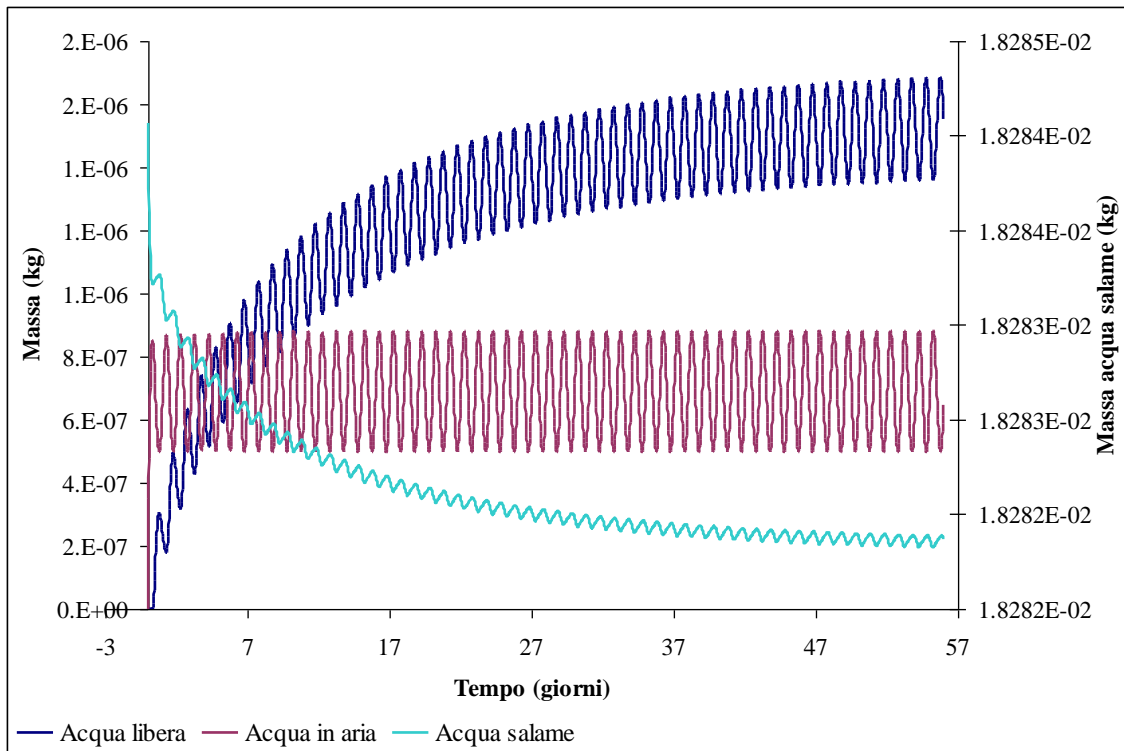
Nel grafico 11 viene riportato l'andamento del grado igrometrico dell'aria vicino al solido e della miscela aria-vapor d'acqua durante 56 giorni di conservazione. E' possibile osservare che il grado igrometrico dell'aria vicino al solido compie delle piccolissime oscillazioni rispetto a quelle che caratterizzano il grado igrometrico della miscela aria-vapor d'acqua. Nel primo caso i valori sono compresi tra 0.991 e 0.988, mentre nel secondo caso si raggiungono valori pari a 1.08. Tali andamenti, causati dalle oscillazione di temperatura, regolano i fenomeni di evaporazione e condensazione, infatti quando il grado igrometrico della miscela aria-vapor d'acqua è maggiore di 1, l'acqua libera condensa, al contrario, quando è minore o uguale ad 1, l'acqua libera evapora.





**Grafico 11: andamento del grado igrometrico dell'aria vicino al solido e della miscela aria-vapor d'acqua in funzione del tempo di conservazione.**

Nel grafico 12 viene riportato l'andamento delle massa di acqua, in aria, presente nel salame e liquida (disponibile per evaporazione e condensazione). L'andamento dell'acqua presente nel salame rispecchia quello del titolo riportato nel grafico 9, infatti anche in questo caso, si osserva una diminuzione molto ridotta della massa. Tale riduzione provoca un aumento dell'acqua libera che si osserva durante circa i primi venti giorni di conservazione. Infatti l'acqua diffonde dall'interno all'esterno del salame fino a quando l'aria presente nella confezione non è satura. A causa degli sbalzi di temperatura, i gradi igrometrici variano e di conseguenza anche la massa di acqua.



**Grafico 12: andamento della massa di acqua libera, in aria e presente nel salame, in funzione del tempo di conservazione.**

## CONCLUSIONI

L'inversione di un modello ad elementi finiti si è dimostrata una tecnica efficace nella determinazione dei coefficienti di diffusione dell' acqua all'interno di un salame. Inoltre tale tecnica rappresenta una possibilità più economica e veloce rispetto a quelle correnti.

La combinazione di metodi di simulazione numerica con metodi inversi, può rappresentare un nuovo paradigma nel settore delle misure fisiche in senso molto generale (fluidodinamiche, termiche, meccaniche, elettromagnetiche, ...).

Lo sviluppo dei due modelli numerici ha permesso di studiare il campo del titolo dell'acqua all'interno del salame, durante le fasi di maturazione e conservazione, con un grado di dettaglio irraggiungibile dalle tecniche sperimentali. I risultati, in forma integrale, del modello si trovano in ottimo accordo con quelli osservati sperimentalmente.

I modelli sono versatili essendo tutti parametrici. Se ci sono dei dati precisi in ingresso su tempo, temperature di maturazione o conservazione, dimensioni e tipologia di insaccato etc., può funzionare come un potente strumento d'impiego aziendale.



## BIBLIOGRAFIA

- Augustus-Antoine C.(1888), "Tensions des vapeurs; nouvelle relation entre les tensions et les températures", *Comptes Rendus des Séances de l'Académie des Sciences* 107: 681–684, 778–780, 836–837.
- Barat J.M., Baigts D., Aliño M., Fernández F.J. & Pérez-García V.M. (2011). Kinetics studies during NaCl and KCl pork meat brining. *Journal of Food Engineering*, 106, 102-110.
- Bertolini M., Ferretti G., Grassi A. & Montanari R. (2006). Seasoning process design optimization for an ascending flow ripening chamber. *Journal of Food Engineering*, 77, 529-538.
- Bialobrzewski I. & Markowski M. (2004). Mass transfer in the celery slice: effects of temperature, moisture content and density on water diffusivity. *Drying Technology*, 22, 1777-1789.
- Bin X. & Da-Wen S. (2002). Applications of computational fluid dynamics (CFD) in the food industry: a review. *Computers and Electronics in Agriculture* 34, 5-24.
- Cappelli P. & Vannucci V. (2000). Chimica degli alimenti. Ed. Zanichelli. Cap 21.
- Costa-Corredor A., Pakowski Z., Lenczewski T. & Gou P. (2010). Simulation of simultaneous water and salt diffusion in dry fermented sausages by the Stefan-Maxwell equation. *Journal of Food Engineering*, 97, 311-318.
- Del Monte P., Magnani U. & Monari M. (1990). Industria dei salumi igiene, tecnica, legislazione. Edizioni agricole.
- Fabbri A., Cevoli C., Silaghi A.F. & Guarnieri A. (2005). Numerical simulation of physical system in agri-food engineering. Proceedings of AIIA meeting, Catania, Italy.

- Ghanem R. (1997a). Higher order sensitivity of heat conduction problems to random data using spectral stochastic finite element method. *ASME Journal of Heat Transfer*.
- Ghanem R. (1997b). Stochastic finite elements for heterogeneous media with multiple random non-gaussian properties. *ASME Journal of Heat Transfer*.
- Graiver N., Pinotto A., Califano A. & Zaritzky N. (2009). Mathematical modeling of the uptake of curing salts in pork meat. *Journal of Food Engineering*, 95, 533-540.
- Grassi A. & Montanari R. (2005). Simulation of the thermodynamic patterns in an ascending flow ripening chamber. *Journal of Food Engineering*, 68, 113-123.
- Grazia L., Coloretti F. & Zambonelli C. (2011). *Tecnologie dei salumi*, ed. Agricole.
- Kondjoyan A., Rouaud O., McCann M.S., Havet M., Foster A., Swain M. & Daudin J.D. (2006). Modelling coupled heat-water transfers during a decontamination treatment of surface of solid food products by a jet of hot air.I. Sensitivity analysis of the model and first validations of products surface temperature under constant air temperature conditions. *Journal of Food Engineering*, 76, 53-62.
- Kondjoyan A. & Havet M. (2003). Modelling heat transfer in a jet of hot air to decontaminate meat products. *Science des Aliments*, 23, 157-161.
- Krämer J. (1990). *Alimenti microbiologia e igiene*. OEMF.
- La Page J-F., Chevarin C., Kondjoyan A., Daudin J-D. & Mirade P-S. (2009). Development of an approximate empirical-CFD model estimating coupled heat and water transfers of stacked food products placed in airflow. *Journal of Food Engineering*, 92, 208-216.
- Maïçon P. (2004) IFEM research project. Progress report. Faculty of Engineering, U. Stellenbosch, South Africa. Pag. 4-5.

- Martins R.C. (2004). Simple finite volumes and finite elements produces for food quality and safety simulations. *Journal of food engineering*.
- Mendonça Stela L.R., Fihlo Celso R.B. & De Silva Z.E. (2005). Transient conduction in spherical fruits: method to estimate the thermal conductivity and volumetric thermal capacity. *Journal of food engineering*, 67, 261-266.
- Nicolai G. (1989). Conservazione e trasformazione degli alimenti. Hoepli seconda ed.
- Polatoğlu B., Vildan Beşe A., Kaya M. & Aktaş N. (2011). Moisture adsorption isotherms and thermodynamics properties of sucuk (Turkish dry-fermented sausage). *Food and Bioproducts Processing*, 89, 449-456.
- Poomjai Sa- adchom, Thanit Swasdisevi, Adisak Nathakaranakule & Somchart Soponronronnarit. (2011). Mathematical model of pork slice drying using superheated steam. *Journal of Food Engineering*, 104, 499-507.
- Rizzo Antonio (2003). Development of a numerical model for the fluid dynamic simulation of an ascending flow ripening chamber. *Journal of Food Engineering*, 58, 151-171.
- Roberto A., Lemus-Mondaca, Antonio Vega-Gálvez, Nelson O. Moraga. (2011). Computational Simulation and Developments Applied to Food Thermal Processing. *Food Eng. Rev.*
- Sadiku M.N.O (1989) . A simple introduction to finite element analysis of electromagnetic problems. *IEEE Trans. Educ.*, vol. 32, no. 2, pages 85-93.
- Scott G. & Richardson P. (1997). The application of computational fluid dynamics in the food industry. *Trends Food Science Technology*, 8, 119-24.
- Sebastian P., Bruneau D., Collignan A. & Rivier M. (2005). Drying and smoking of meat: heat and mass transfer modeling and experimental analysis. *Journal of Food Engineering*, 70, 227-243.
- Simal S., Femenia A., Garcia-Pascual P. & Rossell C. (2003). Simulation of the drying curves of a meat-based product: effect of the external resistance to mass transfer. *Journal of Food Engineering*, 58, 193-199.

- Simpson R. & Cortes V. (2004). An inverse method to estimate thermophysical properties of foods at freezing temperatures: apparent volumetric specific heat. *Journal of Food Engineering*, 64, 89-96.
- Trujillo F.J., Wiangkaew C. & Tuan Pham Q. (2007) Drying modeling and water diffusivity in beef meat. *Journal of Food Engineering*, 78, 74-85.
- Valdramidis V.P., Belaudre N., Zuniga R., Foster A., Havet M., Geeraer A.H., Swain M., Bernaerts K., Van Impe J.F. & Kondjoyan A. (2005). Development of predictive modeling approaches for surface temperature and associated microbiological inactivation during hot dry air decontamination. *International Journal of Food Microbiology*, 100, 261-274.
- Vodyanova I.V., Storrø I., Olsen A. & Rustad T. (2012). Mathematical modeling of mixing of salt in minced meat by bowl-cutter. *Journal of Food Engineering*, 112, 144-151.
- Zambonelli C., Papa E., Romano P., Suzzi G. & Grazia L. (1992). *Microbiologia dei salumi*. Ed. Agricole.

#### SITI INTERNET

- <http://www.federica.unina.it/medicina-veterinaria/igiene-e-tecnologia-alimentare/igiene-tecnologia-salame/>
- [www.albanesi.it/Alimentazione/cibi/salame.htm](http://www.albanesi.it/Alimentazione/cibi/salame.htm)
- [http://www.samarsalumi.com/lavorazione\\_salami.htm](http://www.samarsalumi.com/lavorazione_salami.htm)