

Codice di simulazione e potenzialità predittive per la stagionatura di salami tradizionali

Simulation code and predictive potentials for the maturing of traditional sausages

Stazione Sperimentale per l'Industria delle Conserve Alimentari,
via F. Tanara 31/A - 43121 Parma

*Università di Salerno – Dipartimento di Ingegneria Industriale

** Collaboratori esterni

Carlo Diaferia, Michele Miccio*,
Pietro Baldini, Lorenzo Castellani**,
Maria Lidia De Rosa**, Michela
Fraganza*, Adriana Lanni**

RIASSUNTO

Gli autori discutono le ipotesi ed i passi necessari allo sviluppo di un modello matematico "a principi primi" di essiccazione del salame in corso di stagionatura. L'articolo compara i dati sperimentali ottenuti da svariate lavorazioni industriali e pilota con i dati ottenuti dal modello matematico. I risultati ottenuti indicano una soddisfacente corrispondenza tra i valori teorici del calo peso e i dati sperimentali, con un errore percentuale dell'ordine del 10% e mai superiore al 25%. Risulta pertanto disponibile un codice di calcolo snello e *user friendly* in MS Visual Basic® 6.0, con documentate potenzialità predittive in termini di perdita di peso in corso di lavorazione e finale, contenuto d'acqua e temperatura di lavorazione del salame.

ABSTRACT

The assumptions and the steps needed to develop a "first principles" mathematical model during sausage maturation are discussed. This article compares the experimental data obtained from a variety of industrial and pilot-scale processes with the data obtained by the mathematical model. The results obtained show a satisfactory correspondence between the theoretical values of weight loss and the experimental data, with a percent error of the order of 10% and never higher than 25%. It therefore provides a manageable and user friendly calculation code in MS Visual Basic 6.0, with documented predictive potentials in terms of weight loss during and after processing, water content and processing temperature.

INTRODUZIONE

Nel settore della trasformazione della carne i salami rappresentano prodotti di grande interesse sul piano sia economico sia nutrizionale. A una differente denominazione di vendita secondo le zone di produzione spesso fa riscontro una diversità anche rilevante: a) nella composizione (tipo di carne, taglio del magro e del grasso, ingredienti ed additivi, natura del budello); b) nelle tecniche di asciugamento e stagionatura (salami a lunga maturazione, salami a breve maturazione).

La preparazione dei salami è basata su un procedimento apparentemente semplice e comprende normalmente le seguenti fasi: 1) cernita e mondatura della carne (consiste nella scelta dei tagli più idonei alla preparazione dell'insaccato); 2) triturazione e miscelazione (i tagli magri e i tagli con maggior contenuto di grasso vengono triturati a bassa temperatura e durante la miscelazione si aggiungono gli ingredienti non carnei e gli additivi che costituiscono la "concia"); 3) insacco in budello suino o bovino, naturale o sintetico; 4) asciugamento (in questa fase il salame è sottoposto a disidratazione mediante il calore per la durata di 5-7 giorni) 5) stagionatura, durante la quale i salami sono portati a completa maturazione.

L'acquisizione delle conoscenze scientifiche sui meccanismi che intervengono nella maturazione dei salumi è abbastanza recente (1 – 10). La conservabilità dei salumi, in particolare degli insaccati crudi stagionati appartenenti alla tradizione italiana, è determinata dalla riduzione del valore dell'acqua libera, a_w , (attività dell'acqua), al di sotto dei limiti di accrescimento dei microrganismi di alterazione (11).

La possibilità di descrivere il processo di essiccazione dipende dalla conoscenza dei fenomeni legati al trasporto interno (diffusione) e all'evaporazione dell'acqua dalla superficie del prodotto verso l'esterno (scambio superficiale). Negli anni sono state sviluppate un numero significativo di teorie che descrivono il processo di diffusione: la diffusione molecolare, la diffusione capillare, la diffusione di liquidi attraverso la porosità dei solidi, la condensazione-evaporazione (12-14).

I salumi oggetto del presente lavoro appartengono a tre tipologie di prodotto: salsicce, salami e soppressate, e provengono dall'esperienza sia di progetti di ricerca scientifica applicata nel settore, sia di produzione industriale. In particolare, si citano il progetto finanziato dall'Unione Europea EU FAIR No. CT 96-1220 "DRIP - Dry Sausages Ripening Improvement Project", 1996-2000 ed il progetto MIUR D.M. 1105 del 09/10/2002, decreto di affidamento n. 1357 del 11/05/2004 "Caratterizzazione dei prodotti di salumeria rispondenti al disciplinare dei salumi tipici Calabresi e tecniche di confezionamento in imballaggi attivi. Individuazione dei fattori di tipicità e sperimentazione di ottimizzazione delle produzioni".

Gli scopi del presente lavoro sono:

- Avere a disposizione uno strumento matematico che interpreti i risultati sperimentali di essiccazione dei salami e ne aiuti la comprensione degli aspetti teorici
- Fornire a tale strumento matematico un carattere predittivo, che faccia cioè calcoli di essiccazione quando sono note le proprietà del salame e le condizioni dell'asciugamento e della stagionatura
- Trasferire tale strumento matematico in un codice di calcolo per PC, con interfaccia amichevole e flessibile
- Mettere a punto uno strumento utile per l'impostazione di un piano di stagionatura, prevedendo le perdite di peso ed il contenuto residuo di acqua.

MATERIALE E METODI

Prodotti stagionati

I salumi oggetto del presente lavoro appartengono a tre categorie: salsicce, salami e soppressate, e si differenziano tra loro per le dimensioni, la diversa scelta del budello, il diverso metodo di lavorazione, la durata della stagionatura, nonché naturalmente le diverse caratteristiche organolettiche del prodotto finito. Gli impasti sono in generale composti da tagli magri di differente provenienza anatomica, da tagli grassi (prevalentemente pancetta), sale, pepe, aromi e spezie varie aggiunte in differenti concentrazioni. L'impasto viene poi insaccato in un involucro costituito di budello animale o artificiale ed, infine, posto in ambienti a condizioni monitorate e controllate per le varie fasi della stagionatura. Lo spessore del budello generalmente ha una certa influenza sui tempi e sui risultati di stagionatura.

Inoltre, i salumi oggetto del presente lavoro si dividono a seconda che la loro trasformazione a prodotto sia avvenuta in una camera di stagionatura industriale (in azienda) oppure "pilota" (presso la Stazione Sperimentale per l'Industria delle Conserve Alimentari - SSICA), essendo quest'ultima costituita da una cella di dimensione molto più piccola di quella industriale, ma capace di produrre un lotto significativo in termini di numero e peso dei pezzi. Inoltre, va precisato che la cella "pilota" consente un monitoraggio più dettagliato ed efficace sia dell'impianto di lavorazione, in particolare per le condizioni operative e le proprietà dell'aria di stagionatura, sia dei prodotti, in particolare per la perdita di peso, l'uniformità nella qualità finale, ecc.

La seguente Tabella 1 fornisce un sommario delle principali caratteristiche dei salami.

TAB. 1 - Principali caratteristiche dei salami presi in considerazione

SALAME	LUOGO DI PRODUZIONE DELL'IMPASTO	TIPO di PRODOTTO	STAGIONATURA g	Proprietà iniziali dei salami "freschi"			
				DIAMETRO mm	LUNGHEZZA mm	PESO INIZIALE kg	CONTENUTO D'ACQUA (% in massa)
CASERO	Spagna	commerciale	14	50	200	0.3	55.7
CULARCOSIDO	Spagna	commerciale	25	80	400	2.5	57.0
CRESPONE MILANO	Piemonte	commerciale	60	95	500	3.0	56.0
TURISTA BUONPIEMONTE	Piemonte	commerciale	14	60	200	0.6	53.7
SALAMI DI BUFALO "impasto 1"	Angrì (SSICA)	Sperimentale carne bufalina (90%) e grasso suino (10%)	51	60	230	0.84	66.0
SALAMI DI BUFALO "impasto 2"	Angrì (SSICA)	Sperimentale carne bufalina (50%) e suina (50%)	51	60	230	0.84	66.0
SOPPRESSATA DOLCE	Spezzano Piccolo (CS)	commerciale	26	71	160	0.625	62.9
SOPPRESSATA PICCANTE	Spezzano Piccolo (CS)	commerciale	27	71	160	0.475	65.0
NEBRODI	Sicilia Orientale (ME)	commerciale	111	60	230	0.85	61.0
SOPPRESSATA MIUR A	Spezzano Albanese (CS)	commerciale	60	50	160	0.6	63.0
SOPPRESSATA MIUR B	Crotone	commerciale	60	66	145	0.6	60.0

Per tutti i salami in Tabella 1 erano disponibili dati acquisiti in tempo reale sul funzionamento e sulle condizioni dell'aria nella camera di stagionatura, nonché determinazioni e misure effettuate sui prodotti prima sul "fresco" e poi a fine stagionatura,

nonché ad intervalli discreti di tempo durante la lavorazione stessa. Per maggiori dettagli si vedano i rapporti finali dei progetti FAIR No. CT 96-1220 "DRIP - Dry Sausages Ripening Improvement Project", 1996-2000 ed il progetto MIUR 11/05/04 "Caratterizzazione dei prodotti di salumeria rispondenti al disciplinare dei salumi tipici Calabresi e tecniche di confezionamento in imballaggi attivi. Individuazione dei fattori di tipicità e sperimentazione di ottimizzazione delle produzioni" (15, 16).

Le diverse caratteristiche dei salami hanno determinato poi una diversa collocazione nella discussione dei risultati della simulazione della loro stagionatura.

Modellazione matematica

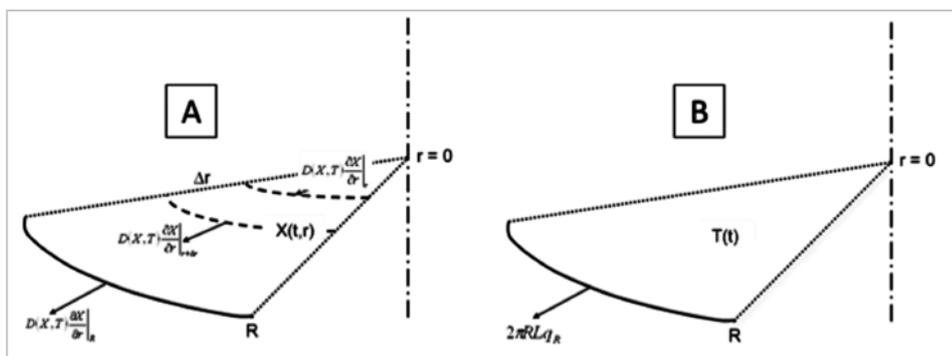
L'oggetto della modellazione matematica e della conseguente simulazione computerizzata è l'essiccazione del singolo salame durante le varie fasi della stagionatura. Con riferimento alla stagionatura industriale dei salami, i risultati ottenuti per il singolo salame sono tranquillamente estendibili ad un lotto di salami uguali se le condizioni di lavorazione nella camera di stagionatura sono omogenee oppure se si utilizzano proprietà dell'aria opportunamente "mediate" sul volume della stessa camera di stagionatura. Gli strumenti teorici usati allo scopo sono stati il bilancio di massa, il bilancio di entalpia nonché le leggi di Fick e di Fourier (17).

Il modello matematico considera le seguenti ipotesi principali:

1. il salame ha forma perfettamente cilindrica con elevato rapporto altezza/diametro
2. il salame ha una "struttura omogenea"
3. il trasferimento dell'acqua all'interno della massa del salame è modellato con la 1ª legge di Fick ed una "diffusione equivalente"; la diffusività, D , è funzione del contenuto locale d'acqua (umidità assoluta, X) oltretutto della temperatura del salame (18)
4. il trasferimento longitudinale (ossia nella direzione dell'asse) dell'acqua è trascurabile rispetto a quello radiale, a causa dell'alto rapporto altezza/diametro
5. la resistenza al trasferimento dell'acqua attraverso il budello è trascurabile
6. le proprietà termofisiche del salame sono funzione del contenuto locale d'acqua (18)
7. il contenuto d'acqua sulla superficie del salame è in equilibrio con l'umidità nel film d'aria all'interfaccia, secondo l'isoterma di Oswin (19)
8. la forza spingente per il trasferimento di massa all'interfaccia è espressa come differenza di concentrazione di umidità relativa tra la superficie del salame e la massa dell'aria nella cella di stagionatura
9. la resistenza al trasferimento sia radiale sia longitudinale di calore è trascurabile: quindi il salame è isoterma.

In sostanza, il modello matematico sfrutta l'accoppiamento di equazioni di bilancio di massa e di entalpia, nonché le leggi della diffusione di materia e di calore, scritte in coordinate cilindriche (raggio r), nell'ipotesi di poter trascurare la dipendenza della temperatura (T) e dell'umidità assoluta (X) del salame dalla coordinata longitudinale (z). La Figura 1 riporta per semplicità un settore della sezione trasversale cilindrica con le citate variabili ed i principali flussi.

FIG. 1 – Visualizzazione delle incognite del modello matematico in un settore della sezione trasversale del salame ai fini del bilancio di: A) massa; B) entalpia



Il bilancio di materia su uno shell cilindrico infinitesimo del salame è:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{D(X,T)}{r} \frac{\partial X}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial r} \left(D(X,T) \frac{\partial X}{\partial r} \right) \quad (1.)$$

soggetto alle condizioni al contorno:

$$- \rho_s D(X,T) \left(\frac{\partial X}{\partial r} \right)_{r=R} = N_R M_w \left(\frac{\partial X}{\partial r} \right)_{r=0} = 0 \quad (2.)$$

ed alla condizione iniziale:

$$X(0,r) = X_0 \quad (3.)$$

Il bilancio di energia sull'intero salame é:

$$\pi R^2 L \rho(\bar{X}) \frac{d\bar{X}}{dt} = 2\pi R L q_R - 2\pi R L N_R M_w \Delta H(T) \quad (4.)$$

soggetto alla condizione iniziale:

$$T(0) = T_0 \quad (5.)$$

dove: X è l'umidità assoluta del salame; ρ_{ds} è la concentrazione dei solidi secchi; L la dimensione longitudinale del salame; $\rho(\bar{X})$ la densità del salame valutata per un valore dell'umidità assoluta, \bar{X} , mediato sulla sezione trasversale; N_R il flusso molare di vapor d'acqua sulla superficie laterale del salame; M_w la massa molecolare dell'acqua; q_R il flusso termico sulla superficie laterale del salame; ΔH il calore latente di vaporizzazione.

Il flusso di materia, N_R , all'interfaccia dipende dalla differenza di concentrazione del vapor d'acqua tra la superficie del salame e l'interno della cella:

$$N_R = k_c \left[\frac{a_{we}(X(R,t)) \cdot p^*(T(t))}{\mathfrak{R}T(t)} - \frac{RH \cdot p^*(T_a)}{\mathfrak{R}T_a} \right] \quad (6.)$$

dove: k_c è il coefficiente di trasporto di materia (m/s) riferito ad una forza spingente espressa come differenza di concentrazione; RH è l'umidità relativa dell'aria di stagionatura; T_a è la temperatura dell'aria di stagionatura; \mathfrak{R} la costante dei gas; $p^*(T)$ la tensione di vapore dell'acqua; a_{we} è l'attività dell'acqua all'equilibrio termodinamico all'interfaccia calcolata dalla legge di Oswin:

$$X(R,t) = K \left(\frac{a_{we}}{1 - a_{we}} \right)^n \quad (7.)$$

con i parametri riportati nella seguente Tabella 2 (20):

TAB. 2 - Parametri di Oswin utilizzati nelle simulazioni

Parte della lavorazione	asciugatura			stagionatura	
	Temperatura [°C]	$K \cdot 10^2$ [kg (H ₂ O) / kg (s.s.)]	n	$K \cdot 10^2$ [kg (H ₂ O) / kg (s.s.)]	n
Turista Buonpiemonte (20)	20	6.97	0.944	8.00	0.934
	10	7.58	0.857	9.35	0.811
Crespone Milano (20)	20	6.56	0.872	8.20	0.854
	10	6.33	0.973	9.15	0.887
Salchichon Cular (20)	20	9.21	0.808	7.98	0.807
	10	10.5	0.744	9.06	0.814
Casero (20)	20	8.18	0.869	7.21	1.027
	10	10.7	0.639	10.4	0.811
Soppressata dolce, Soppressata piccante, Salami Nebrodi, Salami di bufalo, altre soppressate	===	10.8	0.430	10.8	0.430

Il flusso di energia all'interfaccia tiene conto sia dello scambio termico per convezione sia dell'irraggiamento dalle pareti della cella sul salame:

$$q_R = h(T_a - T) + \epsilon \sigma (T_\infty^4 - T^4) \quad (8.)$$

dove: h è il coefficiente di scambio termico (kJ/s m²K); ϵ è l'emissività della superficie del salame; σ la costante di Stefan-Boltzmann; T_∞ la temperatura delle pareti della cella di stagionatura, assunta uguale a quella dell'aria, T_a .

Per il calcolo dei flussi d'interfaccia sulla superficie laterale del salame, sono stati considerati 2 casi differenti: convezione naturale o forzata.

Convezione naturale

Il coefficiente di trasporto di materia, k_c (m/s), è calcolato dalla seguente correlazione per il N. di Sherwood (17):

$$Sh = 0.518 (Gr Sc)^{0.25} \quad \text{con il N. di Grashof} \quad Gr = \frac{L^3 \rho_a^2 g \Delta \rho}{\mu^2 \rho_m} \quad \text{e} \quad \frac{\Delta \rho}{\rho_m} = 2 \frac{\rho_R - \rho^\infty}{\rho_R + \rho^\infty} \quad (9.)$$

dove: L è la lunghezza del salame; ρ_a è la densità dell'aria di stagionatura all'interno della cella.

Il coefficiente di scambio termico per convezione naturale, h , è calcolato dalla seguente correlazione per il N. di Nusselt (17):

$$Nu = 0.518 (Gr Pr)^{0.25} \quad \text{con il N. di Prandtl} \quad Pr = \frac{\mu c_p}{\lambda} \quad (10.)$$

dove: c_p è il calore specifico dell'aria umida (kJ/kg K); λ è la conducibilità termica dell'aria (kJ/s m K).

Le proprietà termofisiche dell'aria sono tutte valutate alla temperatura di film $T_f = (T + T_o)/2$.

Convezione forzata

I flussi di materia, $N_{R'}$, e di energia, $q_{R'}$, all'interfaccia possono essere calcolati in 2 modi diversi a seconda della correlazione per lo scambio termico preferita dalla letteratura.

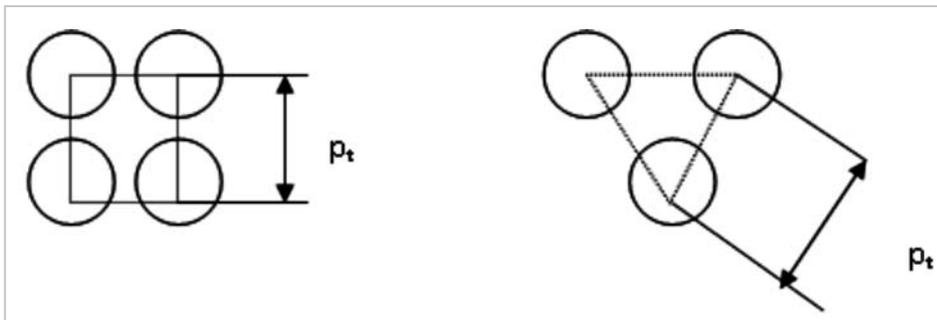
Prima correlazione

Il coefficiente di scambio termico è determinato dalla correlazione di McAdams (21) tratta da studi su scambiatori di calore, più precisamente per il flusso di aria forzata in parallelo ad una schiera di tubi cilindrici:

$$Nu = 0.02 \cdot Re^{0.8} \quad \text{con il N. di Nusselt } Nu = \frac{hd_e}{\lambda} \quad \text{e il N. di Reynolds } Re = \frac{\rho v_a d_e}{\mu} \quad (11.)$$

dove: v_a è la velocità dell'aria (m/s); d_e è il diametro idraulico dipendente dalla disposizione geometrica (m) riportata in Figura 2.

FIG. 2 - Schema di disposizione dei tubi e passo per il calcolo del diametro idraulico



Per una maglia quadrata risulta:

$$d_e = \frac{4 \cdot \left(p_t^2 - \pi \cdot d^2 / 4 \right)}{\pi \cdot d} \quad (12.)$$

dove: p_t il passo (m); d il diametro del cilindro (m).

Per il trasferimento di massa all'interfaccia, si sfrutta l'analogia tra il trasporto convettivo di calore e materia.

La relazione tra coefficiente di scambio di calore e materia è espressa in letteratura come una funzione del N. di Lewis (22):

$$\frac{h}{k_c} = \rho c_h (Le)^n = \rho c_h \left(\frac{\alpha}{D} \right)^n \quad (13.)$$

dove: c_h il calore specifico dell'aria umida (kJ/kg K); n un esponente empirico; α la diffusività termica (m^2/s); D la diffusività del vapor d'acqua in aria (m^2/s).

Seconda correlazione

La seconda correlazione fa riferimento ad una geometria piana e, quindi, fa ricorso alla lunghezza, L , del salame piuttosto che al suo diametro.

Il coefficiente di scambio termico è quello suggerito da Perry et al. (23):

$$Nu = 0.648 \cdot Re^{0.5} \cdot Pr^{\frac{1}{3}} \quad \text{con il N. di Nusselt } Nu = \frac{hL}{\lambda} \quad \text{e il N. di Reynolds } Re = \frac{\rho v_a L}{\mu}$$

Il coefficiente di scambio di materia è sempre suggerito da Perry et al. (23):

$$k_c = v_a \frac{J_d}{Sc^{2/3}} \quad \text{con il fattore di Chilton Coburn } J_d = 0.037 Re^{-0.2} \quad \text{e il N. di Schmidt } Sc = \frac{\mu}{\rho D}$$

Pertanto, in questo secondo caso, il calcolo dei due coefficienti di scambio termico e materiale risulta disaccoppiato.

Perdita di peso e profilo di umidità

La massa del salame può essere calcolata ad ogni tempo, come pure a fine stagionatura, attraverso un bilancio di massa sull'acqua contenuta nel salame:

$$M(t) = m_{ds} X_{av}(t)$$

e la perdita di peso del salame può essere calcolata per differenza:

$$\Delta M(t) = m_{ds} [X_0 - X_{av}(t)]$$

dove il valor medio del contenuto d'acqua nel salame al tempo t è:

$$X_{av}(t) = \frac{1}{\pi R^2} \int_0^R 2\pi r X(r, t) dr$$

Proprietà e correlazioni termofisiche

$$D = \left[0.75 + 8.4 \cdot 10^{-5} \cdot (T - 273)^{3.4} \right] \exp[(X - 0.2) \cdot 0.69] 10^{-11} \max \left[1; \frac{(T - 273)}{17} \right] \cdot \left\{ 1 + \max[0; 0.06 \cdot (X - 0.6) \cdot (T - 273)] \right\}$$

D = coefficiente di diffusione "effettiva"

$$\rho_{ds}^* = (0.01363 \cdot X + 0.031849)^{-2} \quad \text{densità di massa secca}$$

$$\lambda = \frac{0.57 \cdot X + 0.2}{1 + X} \quad \text{conducibilità termica}$$

$$c_p = \frac{4200 \cdot X + 2000}{1 + X} \quad \text{calore specifico}$$

$$\Delta H_{vap} = 2507000 - 2268 \cdot (T - 273) \quad \text{calore latente di vaporizzazione}$$

Risoluzione del modello

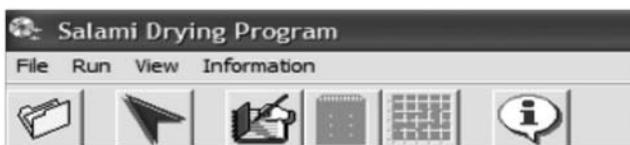
La PDE (equazione differenziale parziale) relativa al bilancio di materia è stata risolta con il metodo esplicito alla differenze finite, suddividendo il campione in $N_r = 14$ strati concentrici di spessore Δr , eccetto lo strato iniziale e finale pari a $\Delta r/2$, il tempo in intervalli di ugual dimensione $\Delta t = 600$ s, ed avendo cura che fosse $[D(X, T)\Delta t/\Delta r^2] < 1/2$. La ODE (equazione differenziale ordinaria) relativa al bilancio di energia è stata risolta con il metodo di Eulero esplicito, adottando lo stesso passo temporale Δt . Il relativo codice è stato scritto in MS Visual Basic© 6.0.

CODICE DI CALCOLO

La risoluzione del problema e la conseguente determinazione delle perdite di peso è stata affidata ad un programma scritto in MS Visual Basic© 6.0 per Windows XP, facilmente accessibile all'utente grazie ad un'interfaccia d'immediata comprensione ed interpretazione.

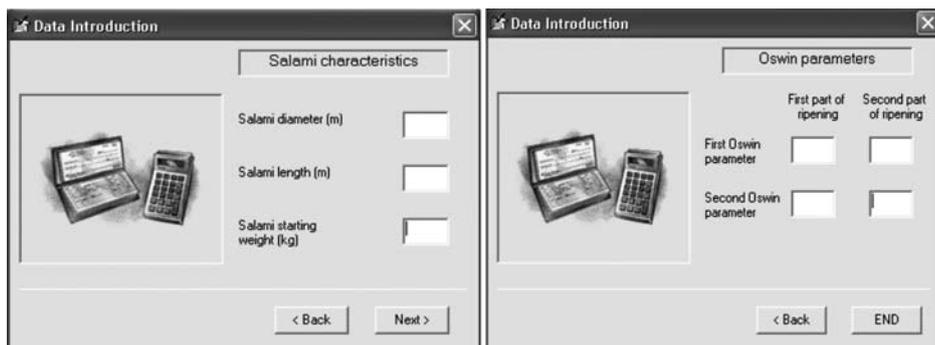
Il programma è costituito di un *form* MDI principale, 23 *form* (pagine) secondari nonché di 2 moduli esterni che raccolgono le *routines* di calcolo e le funzioni che possono essere condivise da più *form* distinti.

Il *form* principale accoglie una **barra di menù** cui corrisponde una **toolbar** con pulsanti di scelta rapida che permettono di accedere direttamente, con una semplice pressione del tasto, alle opzioni di menù più importanti.



L'utente è guidato nell'introduzione dei dati necessari alla simulazione tramite delle schermate d'immissione, può visualizzare i dati inseriti e, ove necessario, apportare le modifiche del caso. In particolare vengono richieste i dati relativi alle condizioni specifiche di stagionatura (giorni, caratteristiche dell'aria della cella: T e UR)

quelli relativi allo specifico prodotto (diametro, lunghezza, contenuto d'acqua iniziale, temperatura iniziale) nonché i sucitati parametri di Oswin.



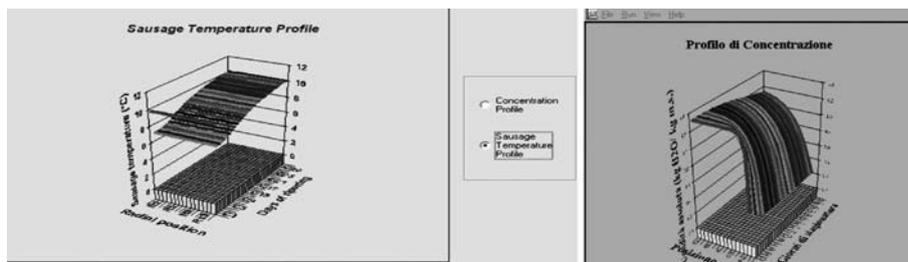
Alcune finestre di avviso compaiono all'occorrenza o per avvertimento



Dopo aver eseguito la simulazione il programma salva i risultati richiesti in forma di file di dati in formato testo, restituisce alcuni risultati in forma tabulare

Tempo(s)	0	600	1200	1800	2400	3000	3600
RadialPositk							
1	1,324	1,324	1,324	1,324	1,324	1,324	1,324
2	1,324	1,324	1,324	1,324	1,324	1,324	1,324
3	1,324	1,324	1,324	1,324	1,324	1,324	1,324
4	1,324	1,324	1,324	1,324	1,324	1,324	1,324
5	1,324	1,324	1,324	1,324	1,324	1,324	1,324
6	1,324	1,324	1,324	1,324	1,324	1,324	1,324
7	1,324	1,324	1,324	1,324	1,324	1,324	1,324
8	1,324	1,324	1,324	1,324	1,324	1,324	1,324
9	1,324	1,324	1,324	1,324	1,324	1,324	1,324
10	1,324	1,324	1,324	1,324	1,324	1,324	1,324
11	1,324	1,324	1,324	1,324	1,324	1,324	1,324
12	1,324	1,324	1,324	1,324	1,324	1,324	1,324
13	1,324	1,324	1,3239	1,3237	1,3235	1,3232	1,3228
14	1,324	1,3032	1,2829	1,2631	1,2437	1,2247	1,2061

e visualizza il grafico dei profili di temperatura e di contenuto d'acqua nel salame



I tempi di calcolo sono dell'ordine del minuto su PC con processore Pentium 5.

Il codice di calcolo può essere adattato all'utilizzo per simulazioni della stagionatura a "più di 2 fasi". In tal caso, è necessario condurre più "run" consecutivi del programma, ciascuno relativo ad una "fase" ed avente la durata nota o prefissata per quella "fase". Per ogni "run" successivo, i "nuovi" dati in *input* alla simulazione sono i valori ottenuti in *output* o semplicemente rielaborati dal "run" precedente, in particolare: contenuto d'acqua, peso e temperatura del salame.

RISULTATI E DISCUSSIONE

Il confronto tra le previsioni del modello matematico, attraverso i risultati del relativo codice di calcolo, ed i risultati sperimentali è condotto innanzitutto per la variabile di maggiore interesse pratico e di più facile verifica durante la stagionatura: la perdita di peso del salame.

Perdita di peso

La Figura 3A-C riporta l'andamento della perdita di peso (% in massa) nel tempo predetta dal modello matematico per i salami Turista Buonpiemonte, Cosido e Casero, caratterizzati da diametro relativamente piccolo (80 mm max) e destinati a corta stagionatura (meno di 4 settimane). Per tutti e tre i salami citati, che sono peraltro normalmente prodotti per via commerciale, erano disponibili i dati sperimentali di perdita di peso dallo svolgimento di prove di stagionatura sperimentali presso la SSICA di Parma durante il progetto FAIR-DRIP (15) ognuna con un lotto di circa 100 kg ripartito su 2 rack separati.

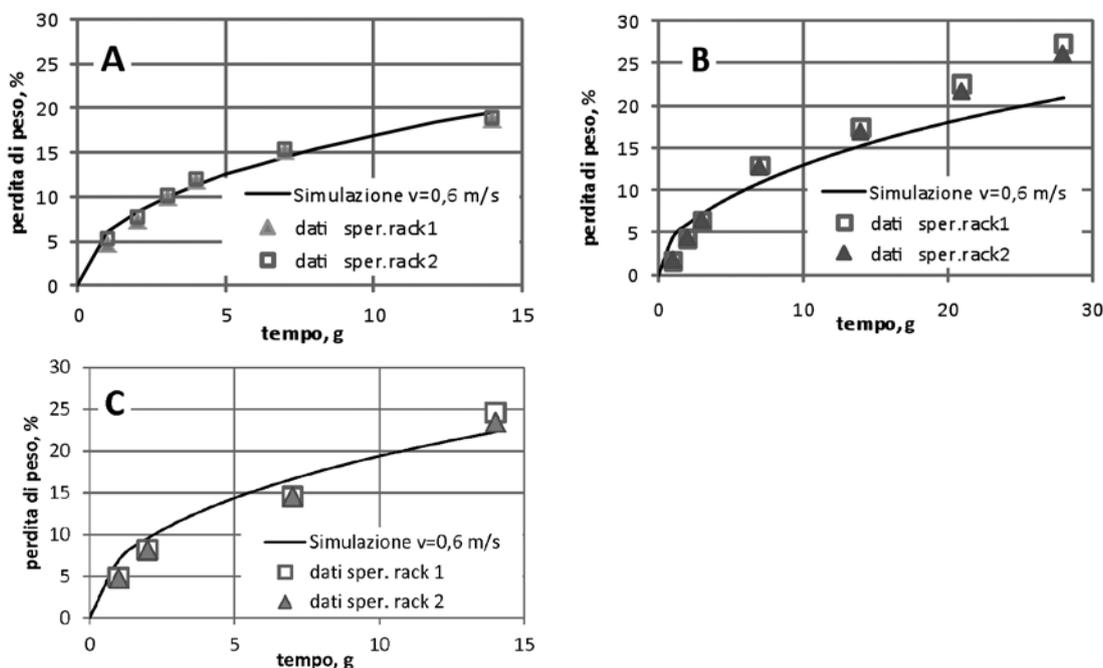


FIG. 3 - andamento della perdita di peso (% in massa) nel tempo: A) Turista Buonpiemonte; B) Cosido; C) Casero

Le simulazioni sono state condotte in convezione forzata con una velocità tangenziale media dell'aria $v=0.6$ m/s, ad 1 fase per il Turista Buonpiemonte ed il Cosido, a 2 fasi per il Casero (fase 1 di 3 giorni con $T=14^{\circ}\text{C}$ ed $UR=70\%$; fase 2 di 11 giorni con $T=15^{\circ}\text{C}$ ed $UR=78\%$). In tutti e 3 i casi la predizione fornita dal modello è soddisfacente, in termini sia di differenza tra valore predetto e misurato, sia di evoluzione della tendenza nel tempo. Per il Cosido il modello, pur presentando un accordo ragionevole, mostra però una tendenza a sottostimare la perdita di peso nel tempo fino a un massimo di 6 punti in %.

La Figura 4A-D riporta l'andamento della perdita di peso (%) nel tempo predetta dal modello matematico per i salami Crespone, "di bufalo", Nebrodi, nonché per la soppressata calabra definita come "MIUR A", caratterizzati da vario diametro, ma tutti da lunga sta-

gionatura (almeno 8 settimane). Per i primi tre salami citati erano disponibili i dati sperimentali di perdita di peso dallo svolgimento di prove di stagionatura sperimentali presso la SSICA di Parma (15) e di Anгри (16, 10), con lotti uguali di circa 50 kg ripartiti su 2 rack rispettivamente per Crespone, "bufalo" e soppressata, mentre con 3 lotti diversi per impasto di circa 30 kg per i Nebrodi (10).

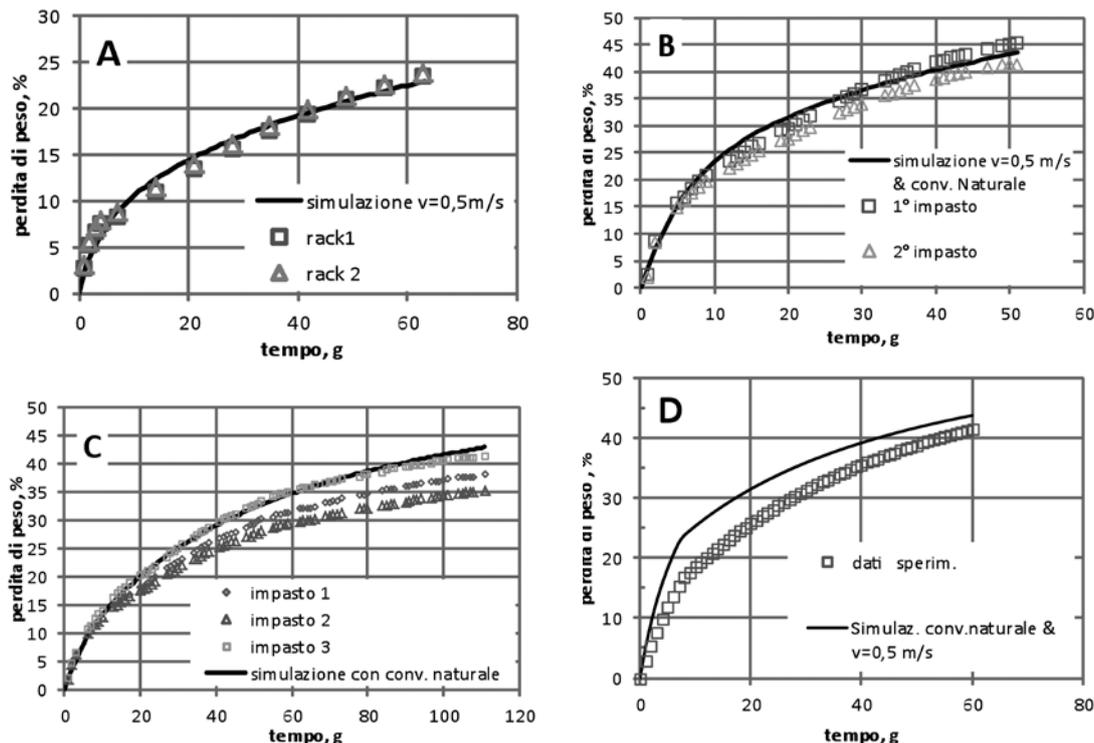


FIG. 4 - andamento della perdita di peso (% in massa) nel tempo: A) Crespone Milano; B) salami di bufalo; C) Nebrodi; D) Soppressata MIUR A

La simulazione è stata condotta a 2 fasi per il Crespone (convezione forzata con $v=0.6$ m/s; fase 1 di 5 giorni con $T=19.5^{\circ}\text{C}$ ed $UR=69\%$; fase 2 di 58 giorni con $T=12.8^{\circ}\text{C}$ ed $UR=79\%$), i "salami di bufalo" (fase 1 di 4 giorni con $v=0.5$ m/s, $T=18^{\circ}\text{C}$ ed $UR=70\%$; fase 2 di 47 giorni in convezione naturale, $T=12^{\circ}\text{C}$ ed $UR=55\%$) e soppressata (fase 1 di 7 giorni con $v=0.5$ m/s, $T=19.8^{\circ}\text{C}$ ed $UR=72\%$; fase 2 di 53 giorni in convezione naturale, $T=12^{\circ}\text{C}$ ed $UR=82\%$); viceversa, tutta in convezione naturale per i salami Nebrodi (fase 1 di 7 giorni con $T=13.6^{\circ}\text{C}$ ed $UR=68\%$; fase 2 di 104 giorni con $T=9.9^{\circ}\text{C}$ ed $UR=78\%$). Per i dati iniziali per il codice di simulazione relativi ai salami Nebrodi, si sono considerati i valori medi sui tre impasti. La predizione fornita dal modello è sicuramente soddisfacente per il Crespone, i "salami di bufalo" e, per i salami Nebrodi, limitatamente all'impasto 3 (v. i quadrati in Fig. 4C); viceversa, il modello sovrastima nettamente la perdita di peso nel tempo dei Nebrodi per gli impasti 1 e 2 (v. i rombi ed i triangoli in Fig. 4C) e della soppressata (Fig. 4D). La spiegazione più convincente nel caso dei Nebrodi è che la sovrastima sia attribuibile ad una diminuzione del coefficiente di diffusione effettiva quando l'impasto cambia, in particolare il contenuto di grasso. Nel caso della soppressata, il modello fallisce nel prevedere la tendenza a perdere peso nella fase 1 in convezione forzata, in quanto determina una velocità di evaporazione assai più elevata di quella reale. La Figura 5A-C riporta l'andamento della perdita di peso (%) nel tempo predetta dal modello matematico per una soppressata calabra denominata "MIUR B", una soppressata piccante ed una dolce, tutte caratterizzate da elevata perdita di peso del prodotto finito (almeno il 40%). Per la prima delle tre citate erano disponibili i dati sperimentali di perdita di peso dallo svolgimento di una stagionatura sperimentale presso la SSICA di Anгри, con un lotto di circa 25 kg ripartito su 3 livelli nel rack; per le rimanenti due soppressate erano stati forniti dei dati globali di perdita di peso, in realtà solo poche determinazioni, rilevazioni eseguite in Azienda nella produzione di lotti industriali da 2 q a 2 t circa, trasferiti attraverso più celle durante la stagionatura.

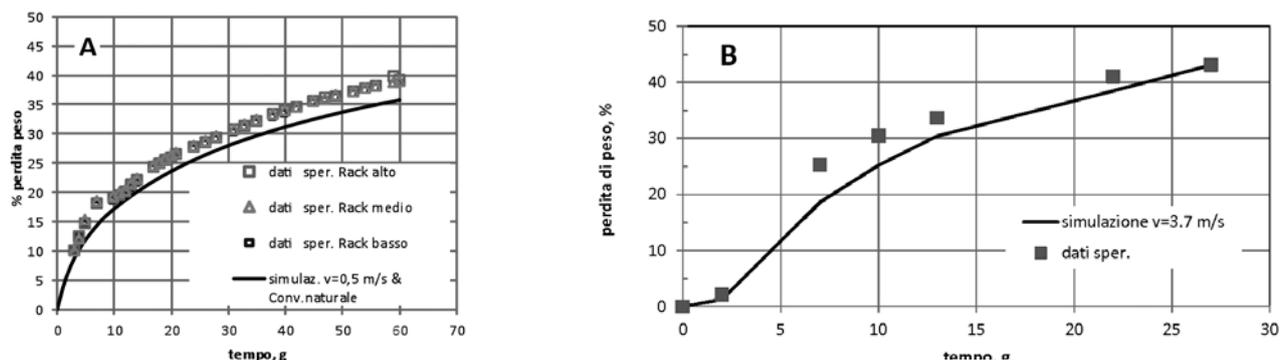
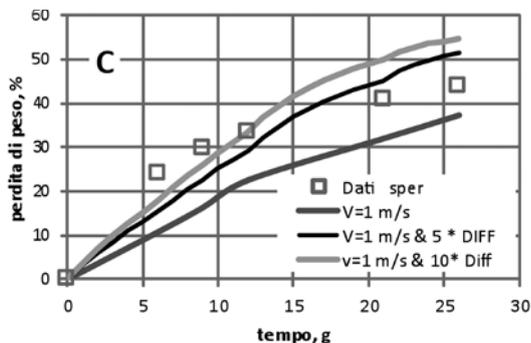


FIG. 5 - andamento della perdita di peso (% in massa) nel tempo: A) soppressata MIUR B; B) soppressata piccante; C) soppressata dolce



La simulazione è stata condotta a 2 fasi per la soppressata MIUR B (fase 1 di 7 giorni con $v=0.5$ m/s, $T=13.8^{\circ}\text{C}$ ed UR= 67%; fase 2 di 53 giorni in convezione naturale con $T=11^{\circ}\text{C}$ ed UR=77%); viceversa, la simulazione è stata condotta a più fasi per le soppressate "piccante" e "dolce". In particolare, per la soppressata piccante, in accordo con le informazioni fornite dal produttore, la 1ª fase è stata condotta in convezione naturale, mentre le 6 successive, corrispondenti anche a cambiamenti di cella per il lotto in produzione, in convezione forzata a 3.7 ($v=3.7$ m/s), con i dati di T e UR riportati per ciascuna fase nella Tabella 3. Per la soppressata dolce, in accordo con le informazioni fornite dal produttore, la simulazione è stata condotta a più fasi sempre in convezione forzata, a $v=1$ m/s e con i dati di T e UR riportati per ciascuna fase nella Tabella 4.

TAB. 3 - dati per la simulazione a più fasi della soppressata piccante

Fase N.	Durata, g	Convezione	T aria (°C)	UR, %
1	2	naturale	12.0	85.0
2	5	forzata	18.9	64.3
3	3	forzata	15.1	81.9
4	3	forzata	11.1	81.9
5	9	forzata	13.0	74.0
6	5	forzata	14.2	72.3
7	1	forzata	10.1	79.2

TAB. 4 - dati per la simulazione a più fasi della soppressata dolce

Fase N.	Durata, g	T aria, °C	UR, %
1	6	12	83
2	3	15,1	83
3	3	13	82
4	9	13	74
5	5	14	72

La soppressata presenta un andamento ragionevole della predizione del modello rispetto ai risultati sperimentali, però con una sottostima sistematica della perdita di peso nel tempo fino a un massimo di 3 punti in %. Per la soppressata piccante, la simulazione eseguita a più fasi fornisce un soddisfacente confronto con i dati sperimentali, tenuto conto delle limitazioni in questo caso derivanti dalla stagionatura industriale che sicuramente è caratterizzata da maggiore variabilità delle condizioni termo-igrometriche nella camera e che era stata condotta trasferendo il lotto di produzione tra più celle; la previsione di perdita di peso fornita dal modello risulta particolarmente buona ad inizio e fine lavorazione. Viceversa, per la soppressata dolce la predizione del modello non è soddisfacente e sottostima notevolmente l'andamento della perdita di peso rispetto ai risultati sperimentali (v. curva nero grassetto in Fig. 5C).

Tuttavia, proprio questo caso ci ha consentito di dimostrare l'effetto che ha sulla predizione del modello la diffusività effettiva dell'acqua, consentendone di migliorare la capacità predittiva. Infatti, fermo restando la convezione forzata a $v=1$ m/s, se si considera il coefficiente di diffusione come un parametro aggiustabile moltiplicandolo per un fattore 5 prima e 10 poi, si ottiene una predizione caratterizzata da un andamento più ripido. Incrementando il coefficiente di diffusione di un fattore 5, la curva della perdita di peso simulata si avvicina complessivamente all'andamento sperimentale; per un fattore 10, la perdita di peso risulta largamente sovrastimata nelle fasi finali di stagionatura.

Si può concludere, quindi, che l'impasto della soppressata dolce è caratterizzato da una diffusione effettiva dell'umidità al suo interno tale da rendere il coefficiente di diffusione preso come riferimento nel modello Imre e Korney sottostimato (18). In ogni caso, anche per i dati sperimentali della soppressata dolce valgono le maggiori limitazioni ed incertezze derivanti dalla stagionatura industriale.

Infine, la Figura 6 riporta in un unico diagramma il confronto a fine stagionatura tra la perdita di peso simulata e quella sperimentale per tutti e 10 i salami presi in considerazione. Nella maggior parte dei casi, la previsione di perdita di peso calcolata per simulazione è all'interno della fascia del 10% di errore.

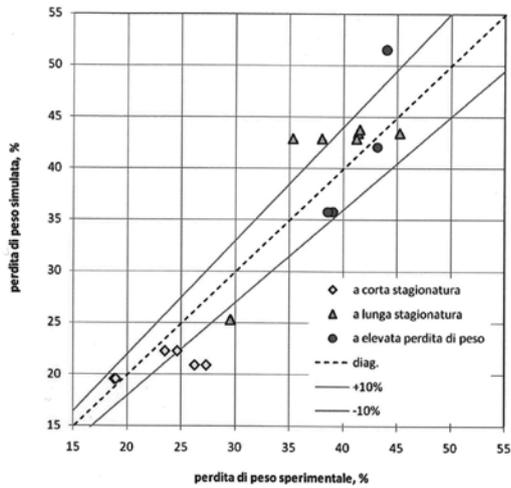


FIG. 6 - confronto a fine stagionatura tra la perdita di peso simulata e quella sperimentale per tutti e 10 i salami

A giustificare le discrepanze relativamente ai salami stagionati con circolazione forzata dell'aria all'interno della cella di essiccazione, interviene anche il fatto che il processo reale di stagionatura prevede delle alternanze di marcia/sosta della cella, fatto difficile da riprodurre tramite simulazione, mentre il modello matematico qui discusso ha sempre trattato la circolazione forzata dell'aria come continua.

A complementare la validazione sulla perdita di peso predetta dal modello in corso ed alla fine della lavorazione, la Fig. 7A-C aggiunge un altro confronto sul valor medio del contenuto d'acqua per alcuni salami di riferimento, cioè Turista, Cosido e Crespone. L'andamento nel tempo della frazione massica di umidità (%) predetta del modello è riportato a fronte di quella misurata sperimentalmente.

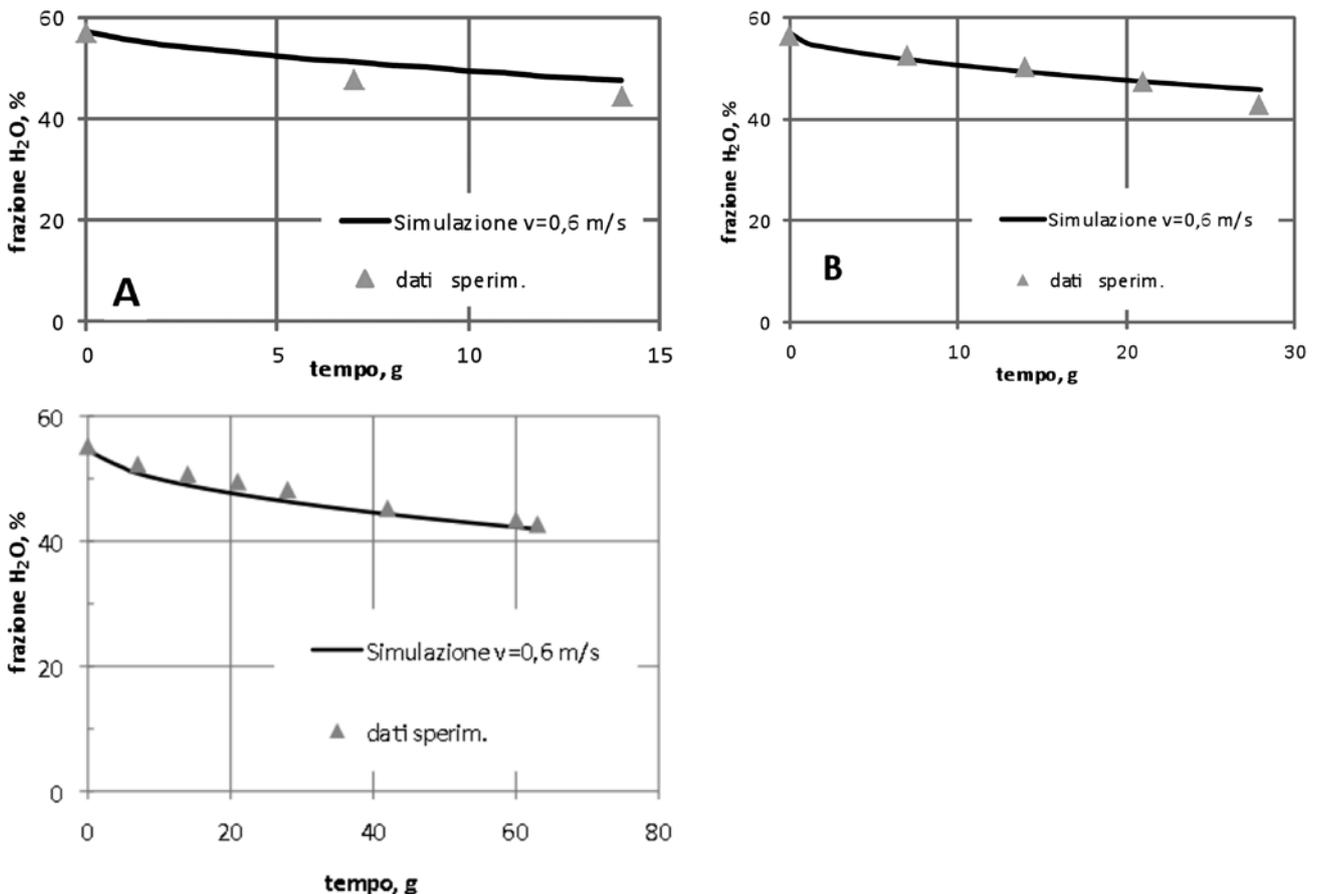


FIG. 7 - Confronto tra il contenuto d'acqua determinato sperimentalmente e quello predetto del modello (valore mediato) per i salami A) Turista Buonpiemonte, B) Cosido, C) Crespone Milano

La capacità predittiva del modello è ottima e l'accordo è perfetto.

Profili di Temperatura

La Figura 8A-C riporta l'andamento nel tempo dei caratteristici profili di temperatura per tre salami presi a riferimento, cioè Turista Buonpiemonte, Casero e Crespone Milano.

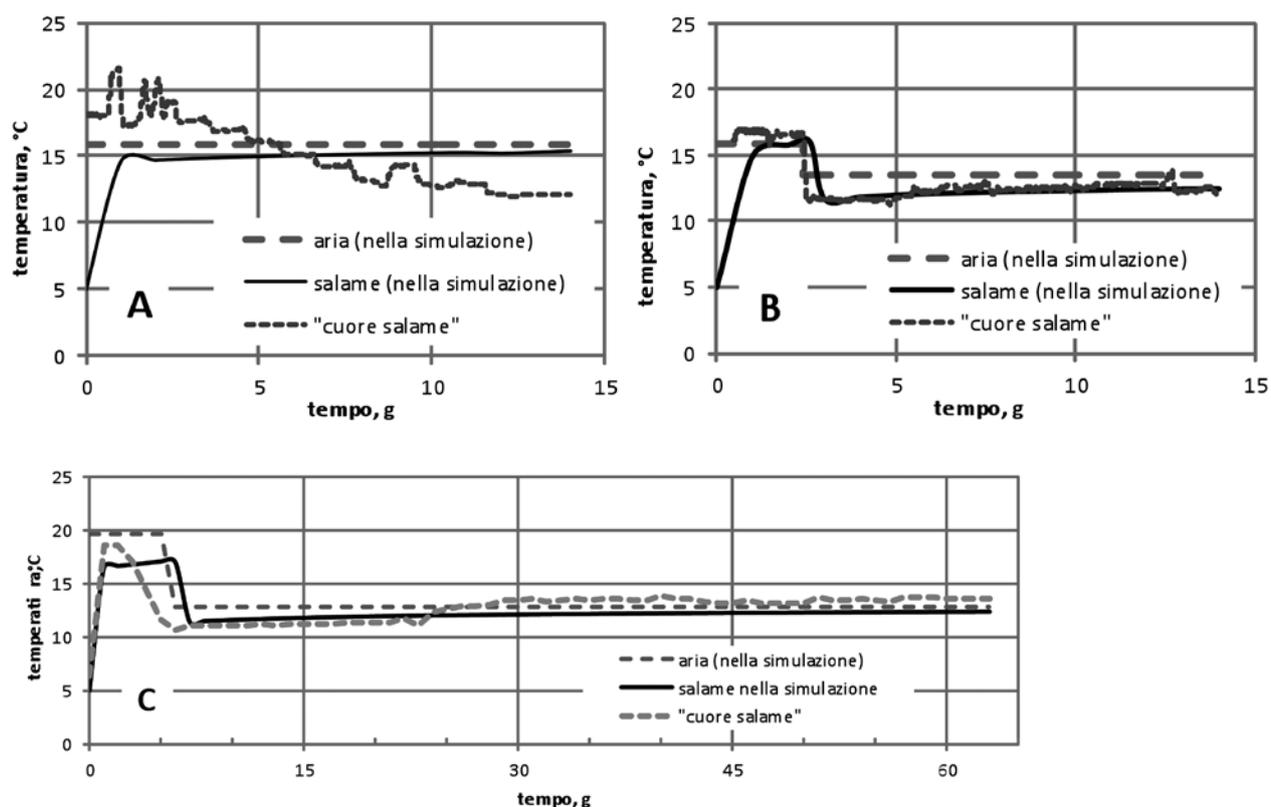


FIG. 8 - andamento nel tempo dei caratteristici profili di temperatura per i salami: A) Turista Buonpiemonte, B) Casero, C) Crespone Milano

La linea spezzata rappresenta il valore, assunto per i calcoli di modello, della temperatura dell'aria nella cella di stagionatura: si noti nelle Fig. 8B-C la variazione a gradino che corrisponde, nella simulazione, al passaggio dalla 1° alla 2° fase. La linea punteggiata riporta l'andamento, filtrato con media mobile di periodo 20, della serie temporale delle temperature "di cuore" del salame, misurate nel corso delle stagionature sperimentali presso la SSICA di Parma durante il progetto FAIR-DRIP (15); essa riflette i disturbi e la variabilità connessi alle misure sperimentali. La linea continua nera riporta l'andamento predetto dal modello per la temperatura del salame, che è uniforme per la citata ipotesi di "parametri concentrati".

Innanzitutto, si noti come la differenza tra la temperatura "imposta" all'aria e quella del salame, sia teorica che sperimentale, sia di pochissimi gradi, tipicamente 1°C e sino ad un massimo di 4°C: essa rappresenta la forza spingente al trasferimento di calore che deve essere molto piccola data la lentezza richiesta per i processi di asciugatura e stagionatura. Si noti anche il transitorio iniziale di temperatura, dovuto al passaggio dalla temperatura "di frigorifero" dell'impasto a quella "di asciugatura" della cella.

L'accordo tra la temperatura "di cuore" sperimentale e quella prevista dal modello per il salame può essere ritenuto ottimo per i salami Casero e Crespone. Viceversa, la simulazione per il Turista presenta un maggiore scostamento che però è originato da un andamento "con deriva a scendere" dei valori misurati; infatti, il profilo di temperatura determinato da modello per il salame Turista "segue" correttamente la temperatura "imposta" all'aria.

CONCLUSIONI

La scrittura di un modello matematico per lo studio a carattere scientifico dell'essiccazione del salame in corso di stagionatura e/o la simulazione della stagionatura per applicazioni produttive e nel processo industriale richiede la conoscenza e l'affidabilità di dati e, preferibilmente, correlazioni predittive dello scambio termico e di massa tra il salame e l'aria circostante, in condizioni di flusso spesso complesse sia per la geometria sia per il tipo di convezione.

L'impiego delle leggi di Fick per la modellazione del trasferimento interno dell'umidità in un caso complesso, come quello dei salami, è possibile purché si disponga di una stima numerica realistica oppure di una correlazione matematica affidabile per il coefficiente "effettivo" di diffusività. Un modello matematico "a principi primi" ed "a parametri distribuiti" descrive bene il meccanismo del trasferimento interno dell'umidità e consente una simulazione realistica dell'essiccazione del salame in corso di stagionatura. Gli Autori, per svariati casi da lavorazioni industriali e pilota di salami e soppressate, hanno ottenuto una più che accettabile corrispondenza tra i valori teorici del calo peso ed i dati sperimentali, con un errore percentuale che è risulta-

to dell'ordine del 10% e mai superiore al 25%. A giustificare le discrepanze relativamente ai salami stagionati con circolazione forzata dell'aria all'interno della cella di essiccazione, interviene anche il fatto che il processo reale di stagionatura prevede delle alternanze di marcia/sosta della cella, fatto difficile da riprodurre tramite simulazione, mentre il modello matematico qui discusso ha sempre trattato la circolazione forzata dell'aria come continua.

Come prodotto del presente lavoro, risulta pertanto disponibile un codice di calcolo snello e *user friendly* in MS Visual Basic® 6.0, con documentate potenzialità predittive in termini di perdita di peso in corso di lavorazione e finale, contenuto d'acqua e temperatura di lavorazione del salame.

RINGRAZIAMENTI

Il lavoro presentato è stato in parte svolto nel corso del progetto DRIP, finanziato dal programma FAIR della Commissione della Comunità Europea con contratto N. 96-1220, in parte nell'ambito del progetto MIUR 11/05/04 .

Gli autori ringraziano V. Magliano quale tecnico specializzato della SSICA e G. Martuscelli quale studentessa tirocinante di Ingegneria Chimica per il loro contributo al lavoro; sono inoltre grati al prof. G. Cuccurullo e al Prof. R. Pantani per le utili discussioni.

Bibliografia

1. M. T. Letablier, F. Nicolas, *Sci. Aliment.*, 14, 541 (1994)
2. C. Diaferia, G. Pirone, M. Fedele, P. G. Sarra, V. Pruiti, G. Spartà, *Ind. Conserve*, 84, 43 (2009)
3. G. Pirone, C. Diaferia, V. Ciampa, T. Iaccarino, L. La Pietra, *Ind. Conserve*, 82, 127 (2007)
4. C. Diaferia, G. Pirone, V. Ciampa, T. Iaccarino, L. La Pietra, *Ind. Conserve*, 82, 229 (2007)
5. C. Diaferia, G. Madonia, V. Pruiti, G. Spartà, P. Baldini "Pork product and techniques of transformation in the processing of the meat of Nebrodi pig". VI Int. Symposium on the Mediterranean Pig. Capo d'Orlando (ME) 11 – 13 October 2007
6. C. Diaferia, P. Baldini, A. Dossena, R. S. Jordano, L. Medina, G. Salignat, E. Spotti "Microbiological, chemical, physico-chemical and sensorial characteristics of some Mediterranean sausages" Convegno: Food and nutrition for better health, Lanciano 13-15 Giugno 2001
7. L. La Pietra, G. Pirone, M. Longo, R. Raczynsky, C. Diaferia, *Ind. Conserve*, 75, 301 (2000)
8. V. M. Moretti, G. Madonia, C. Diaferia, T. Mentasti, M. A. Paleari, S. Panzeri, G. Pirone, G. Gandini, *Meat Sci.*, 66, 845 (2004)
9. C. Diaferia, V. Ciampa, T. Iaccarino, L. La Pietra, G. Pirone, "Improvement of the technology of production of Calabria POD salami: soppressata and dry-cured sausage", Proceedings of the 3rd CIGR Section VI – International Symposium on Food and Agricultural Products: processing and innovations. Napoli, 24-26 settembre 2007
10. G. Pirone, C. Diaferia, T. Iaccarino, G. Madonia, V. Demarco, V. Pruiti, "Ripening techniques and microbiological characteristics of Nebrodi salame", Proceedings of 6th International Symposium on the Mediterranean Pig, Capo d'Orlando (ME), 11-13 ottobre 2007
11. L. Leistener, in "Water Activity: Theory and Application to Food", eds L. B. Rockland, L. R. Beuchat, Marcel Dekker Inc., New York, Basilea, 295 (1987)
12. J. L. Rossen, K. Hayakawa, "Simultaneous Heat and Moisture Transfer in Dehydrated Food : A Review of Theoretical Model", *AIChESym Series*, 73, 71 (1977)
13. N. P. Zogzas, Z. B. Maroulis, D. Marinos-Kouris, *Drying Technol.*, 12, 483 (1994)
14. M. R. Okos, G. Narsimhan, R. K. Singh, A. C. Weitnauer, in "Handbook of Food Engineering", eds. D. R. Heldman, D. B. Lund, Marcel Dekker Inc., New York, Basilea, Hong Kong, 437 (1992)
15. DRIP - Dry Sausages Ripening Improvement Project (2000), Rapporto finale del progetto FAIR No. CT 96-1220
16. Caratterizzazione dei prodotti di salumeria rispondenti al disciplinare dei salumi tipici Calabresi e tecniche di confezionamento in imballaggi attivi. Individuazione dei fattori di tipicità e sperimentazione di ottimizzazione delle produzioni, Rapporto finale del progetto MIUR D.M. 1105 del 09/10/2002
17. R. B. Bird, W. E. Stewart, E. N. Lightfoot, *Transport Phenomena*, 2nd edition, J. Wiley & Sons (2001).
18. L. Imre, T. Kornyei, Computer simulation of salami drying, *International Journal for numerical methods in Engineering*, 30, 767-777 (1990)
19. C. R. Oswin, *J. Chem. Ind.*, 64, 419 (1946)
20. C. Diaferia, C. Busolli, *Ind. Conserve*, 75, 163 (2000)
21. W. H. McAdams, "Heat Transmission", III Ed., McGraw-Hill, New York (USA) (1954)
22. N. M. Ozisik "Heat Transfer - A Basic Approach", McGraw-Hill, New York (USA) (1985)
23. Perry *et al.*, *Chemical Engineers' Handbook*, 7th Ed., McGraw-Hill, New York (USA) (1998)