

# ESSICCAMENTO

Nel settore delle tecnologie alimentari per essiccamento si intende la rimozione dell'acqua mediante evaporazione, in modo da isolare i costituenti solubili ed insolubili.

In conservazione l'essiccamento riveste una particolare importanza



L'acqua è il mezzo fondamentale in cui si svolgono tutte le più importanti reazioni chimiche, enzimatiche e microbiologiche responsabili delle alterazioni.

L'eliminazione dell'acqua pratica antichissima



conservazione delle carni, del pesce, di molti frutti, ecc.,  
mediante essiccamento al sole conosciuta anche dagli  
uomini primitivi.



Oggi le tecniche di essiccamento presentano un elevato  
contenuto tecnologico.

Grazie alle conoscenze delle trasformazioni indotte dai processi di disidratazione, i moderni impianti di essiccamento consentono di ottenere prodotti finali di alta qualità e di lunga conservazione.

Nei confronti degli altri mezzi di conservazione (surgelazione, irradiazione, sterilizzazione termica, ecc.), gli essiccati presentano



peso e volume ridotti rispetto al prodotto di partenza



minori costi di trasporto e magazzinaggio.

Nel confronto fra i vari metodi di conservazione vanno comunque considerati non soltanto i costi (*produzione, confezionamento, trasporto, magazzinaggio distribuzione*) ma anche qualità generale

# TERMINOLOGIA

## ***Acqua libera, umidità libera:***

l'acqua che può essere rimossa in date condizioni di temperatura e umidità.

## ***Acqua legata:***

l'acqua che presenta una tensione di vapore minore di quella esercitata dall'acqua pura a quella temperatura.



*adsorbimento fisico o chimico sul solido.*

## ***Acqua trattenuta:***

l'acqua inglobata in strutture gel o vincolata da pareti cellulari o fibrose.



*La rimozione dell'acqua legata e trattenuta richiede condizioni più spinte.*

### ***Contenuto in acqua:***

quantità di acqua per unità di peso o volume del solido secco o umido.

### ***Attività dell'acqua, umidità relativa:***

rapporto tra la tensione di vapore dell'acqua presente nell'alimento e la tensione di vapore dell'acqua pura alla stessa temperatura.

### ***Gradiente di umidità:***

distribuzione dell'acqua nel solido, in un dato istante del processo di essiccamento.

### ***Umidità critica:***

contenuto medio in acqua nel momento in cui termina l'essiccamento a velocità costante.

### ***Umidità di equilibrio:***

l'umidità limite alla quale può essere essiccato un solido a specifiche condizioni di temperatura e umidità dell'ambiente circostante.

### ***Flusso capillare:***

flusso attraverso gli interstizi di un solido causato dall'attrazione molecolare liquido-solido.

### ***Diffusione interna:***

movimento del liquido o del vapore attraverso un solido per differenza di concentrazione.

### *Periodo a velocità costante:*

periodo di essiccamento durante il quale l'acqua rimossa per unità di superficie di essiccamento è costante.

### *Periodo a velocità decrescente:*

periodo durante il quale la velocità di essiccamento decresce continuamente

### *Psicrometria:*

settore della fisica che studia le proprietà delle miscele gas-vapore. Per essiccamento "aria-vapor d'acqua"

### *Umidità assoluta H:*

rapporto tra la quantità di acqua e la quantità di aria secca nella quale l'acqua è presente come vapore.

$$\underline{H = \text{Kg H}_2\text{O/Kg aria secca}}$$

### *Umidità relativa percentuale:*

pressione parziale del vapor d'acqua nell'aria diviso per la tensione di vapore dell'acqua alla stessa temperatura.

$$\text{R.H. \%} = 100 P_w / P_s'$$

### *Punto di rugiada*

temperatura alla quale una data miscela di vapor d'acqua e aria diventa satura.

### *Temperatura del "bulbo umido":*

temperatura d'equilibrio raggiunta da una superficie d'acqua quando la velocità del calore trasferito per convezione eguaglia la velocità della massa di vapore allontanata dalla superficie.

## *Temperatura del bulbo secco:*

temperatura di una corrente d'aria, misurabile con un normale termometro.



La capacità di una corrente d'aria di rimuovere il vapor d'acqua che si genera durante l'essiccamento dipende dalla temperatura e dall'umidità che l'aria presenta all'ingresso dell'essiccatore.

## Carte psicrometriche

La pressione di saturazione dell'acqua dipende dalla temperatura.

Se la temperatura dell'aria viene aumentata, e il contenuto d'acqua non varia, la R.H. deve diminuire.

Se la temperatura dell'aria diminuisce la R.H. deve aumentare.

Se poi la diminuzione della temperatura procede, l'aria diverrà satura e in corrispondenza di un'ulteriore diminuzione della temperatura, l'acqua inizierà a condensare.

Ad ogni data umidità assoluta  $H$  ad una data pressione, la temperatura alla quale l'acqua condensa è nota come  
**"punto di rugiada"**

Le varie relazioni possono essere riportate in un diagramma, detto psicrometrico (valido ad una certa pressione)

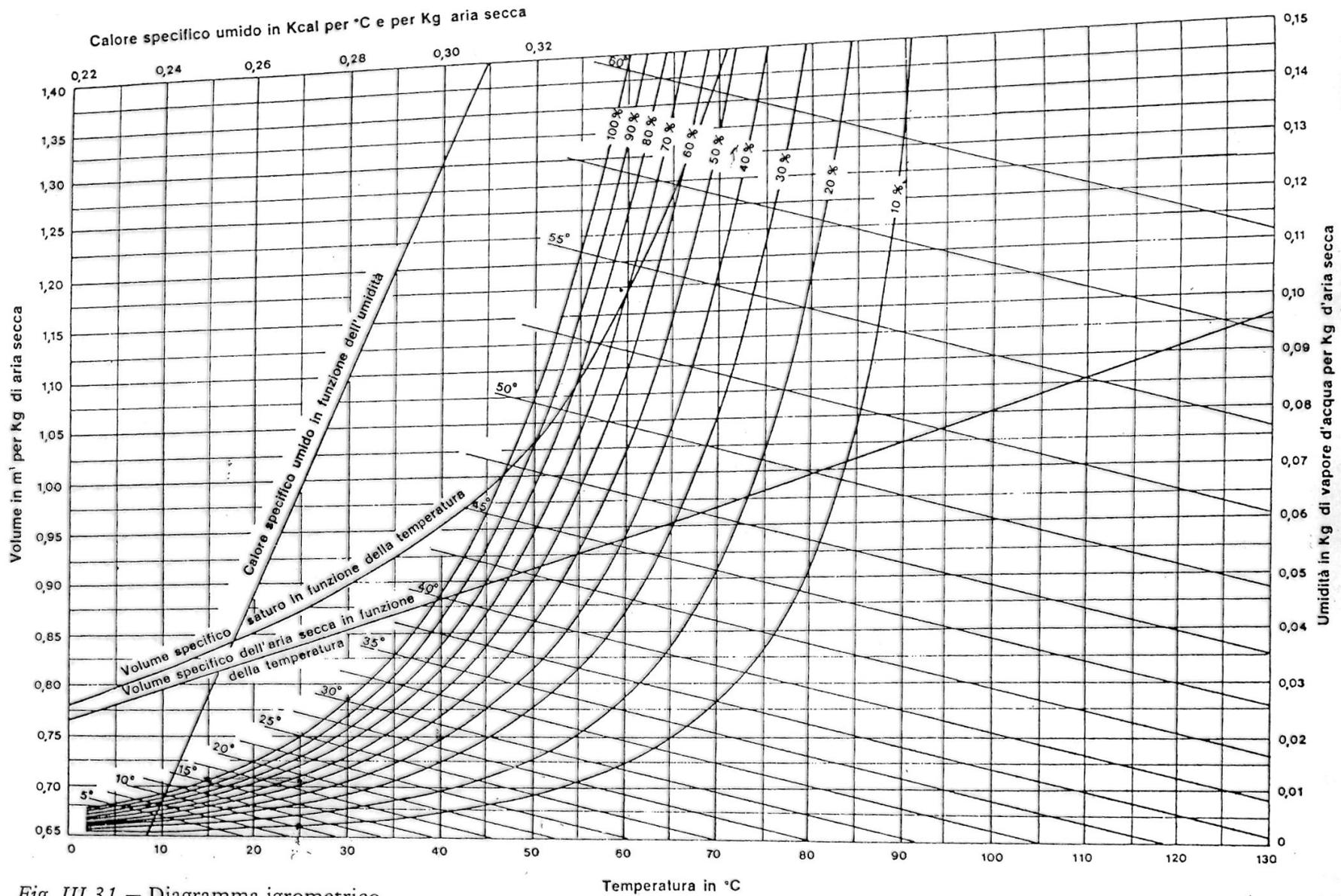


Fig. III.31 – Diagramma igrometrico.

## Utilizzazione delle carte psicrometriche

Le carte psicrometriche possono fornire diverse informazioni:

esempi :

- Noto il punto di rugiada è possibile ricavare il valore dell'umidità di saturazione
- Per ogni valore di  $H$  la corrispondente temperatura a cui si deve portare il sistema per avere una prefissata R.H.
- Se durante un processo di essiccamento si conoscono la R.H. di entrata e di uscita dell'aria, si possono ricavare le corrispondenti umidità assolute  $H$  e quindi l'acqua rimossa per Kg di aria secca.

## *Semplici problemi risolvibili con le carte psicrometriche*

Calcolare :

1. Valore dell'umidità assoluta di aria con il 50% R.H. e una temperatura di bulbo secco di  $60^{\circ}\text{C}$
2. La temperatura di bulbo umido alle stesse condizioni ;
3. l'R.H. di aria con temperatura del bulbo umido di  $45^{\circ}\text{C}$  e quella di bulbo secco di  $75^{\circ}\text{C}$  ;
4. punto di rugiada di aria raffreddata adiabaticamente da una temperatura di bulbo secco di  $55^{\circ}\text{C}$  e un R.H.% del 30 ;
5. il cambiamento di R.H.% di aria con temperatura del bulbo umido di  $39^{\circ}\text{C}$  riscaldata da una temperatura di bulbo secco di  $50^{\circ}\text{C}$  ad una di  $86^{\circ}\text{C}$  ;
6. il cambiamento di R.H.% di aria con temperatura del bulbo umido di  $35^{\circ}\text{C}$  raffreddata adiabaticamente da una temperatura di bulbo secco di  $70^{\circ}\text{C}$  ad una di  $40^{\circ}\text{C}$

## *Misure dell'umidità*

### *Carte psicrometriche*

se sono note le temperature del bulbo umido e del bulbo secco

### *Igrometro a condensazione*

Si raffredda una superficie metallica di un contenitore finché il vapor d'acqua presente nell'aria non condensa. → si misura la temperatura della superficie (temperatura di condensazione) → mediante la carta psicrometrica si può ricavare l'R.H.%

### *Igrometro a capello*

Fornisce un dato approssimativo. Un capello sgrassato, e vincolato ad un sistema a lancetta, subisce delle contrazioni e dilatazioni al variare della umidità. Con un'opportuna taratura è possibile costruire una scala.

### *Igrometro a resistenza elettrica*

Alcuni materiali, es. ossidi di alluminio, polimeri di fenol-formaldeide o di stirene, variano la loro resistività specifica al variare dell'umidità. Con opportune tarature si può costruire un ponte e quindi una scala.

# ***TEORIA DELL'ESSICCAMENTO***

Durante l'essiccamento di un solido si sviluppano simultaneamente due processi fondamentali:

**1)TRANSFER DI CALORE** al liquido da evaporare;

**2)TRANSFER DI MASSA**, come liquido o vapore all'interno del solido e come vapore dalla superficie.

⇒ I FATTORI CHE GOVERNANO LE VELOCITÀ DI QUESTI DUE PROCESSI DETERMINANO LA VELOCITÀ DI ESSICCAMENTO.

➤ Negli impianti di essiccamento il **calore** può essere trasferito per convezione, conduzione, radiazione, combinazione di questi.



Il calore deve raggiungere la superficie del solido e quindi trasferirsi all'interno di questo. Soltanto nel caso del riscaldamento dielettrico (microonde) il calore si trasferisce dall'interno all'esterno del solido.

➤ *La **massa** si trasferisce*

- come liquido o vapore all'interno del solido,
- come vapore dalle superfici esposte.

⇨ la forza motrice che provoca lo spostamento di materia all'interno della matrice solida è un gradiente di concentrazione.

Lo spostamento del liquido all'interno del solido può avvenire attraverso vari meccanismi, in dipendenza dalle caratteristiche fisico-chimiche della matrice solida:

1. **Diffusione**: in solidi omogenei, tipo gel
2. **Flusso capillare**: in solidi granulari e porosi
3. **Flusso causato da contrazioni o gradienti di pressione**
4. **Flusso causato da forze gravitazionali**

In generale un meccanismo predomina sugli altri, ma nell'arco di un processo di essiccamento il meccanismo predominante può essere diverso a seconda dei periodi.

## *Flusso capillare*

L'acqua presente negli interstizi dei solidi, o come **acqua libera** nelle cavità cellulari si muove per capillarità.



L'acqua, **per effetto della tensione superficiale**, fluisce nei capillari che si formano nelle regioni superficiali, nel corso dell'essiccamento.



L'acqua interessata ai fenomeni di capillarità è quella al di sopra del valore di equilibrio

## *Diffusione in fase di vapore*

Richiede lo stabilirsi (all'interno del solido) di un **gradiente di temperatura**

➤ **gradiente di pressione.**

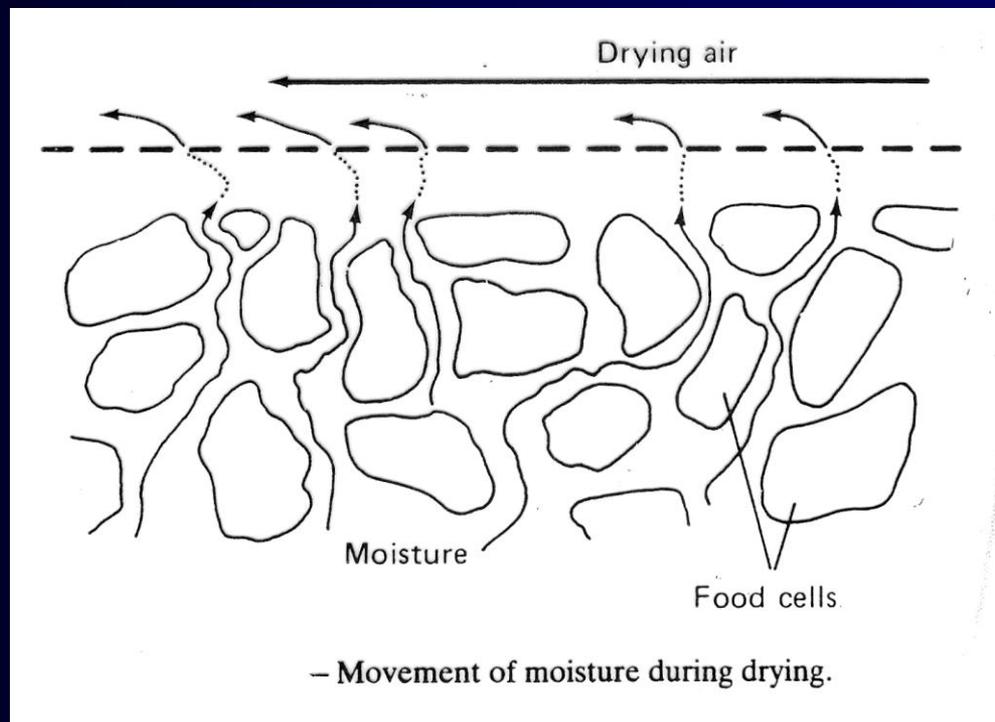
⇨ Può svilupparsi in qualsiasi solido dove

- il riscaldamento avviene su di una superficie e l'evaporazione su di un'altra
- il liquido è isolato fra i granuli di solido.

# Diffusione in fase di liquido

Interessa unicamente :

1. l'umidità al di sopra del punto di saturazione (argilla, amidi, farine, tessuti, carta e lana)
2. sistemi nei quali l'acqua ed i solidi sono mutualmente solubili (minestre, glutine, gelatine, paste, ecc.)
  - ⇒ Il flusso è provocato dai gradienti di concentrazione tra la superficie e l'interno del prodotto → movimento lento che decresce con il diminuire dell'umidità.



## Variabili di processo

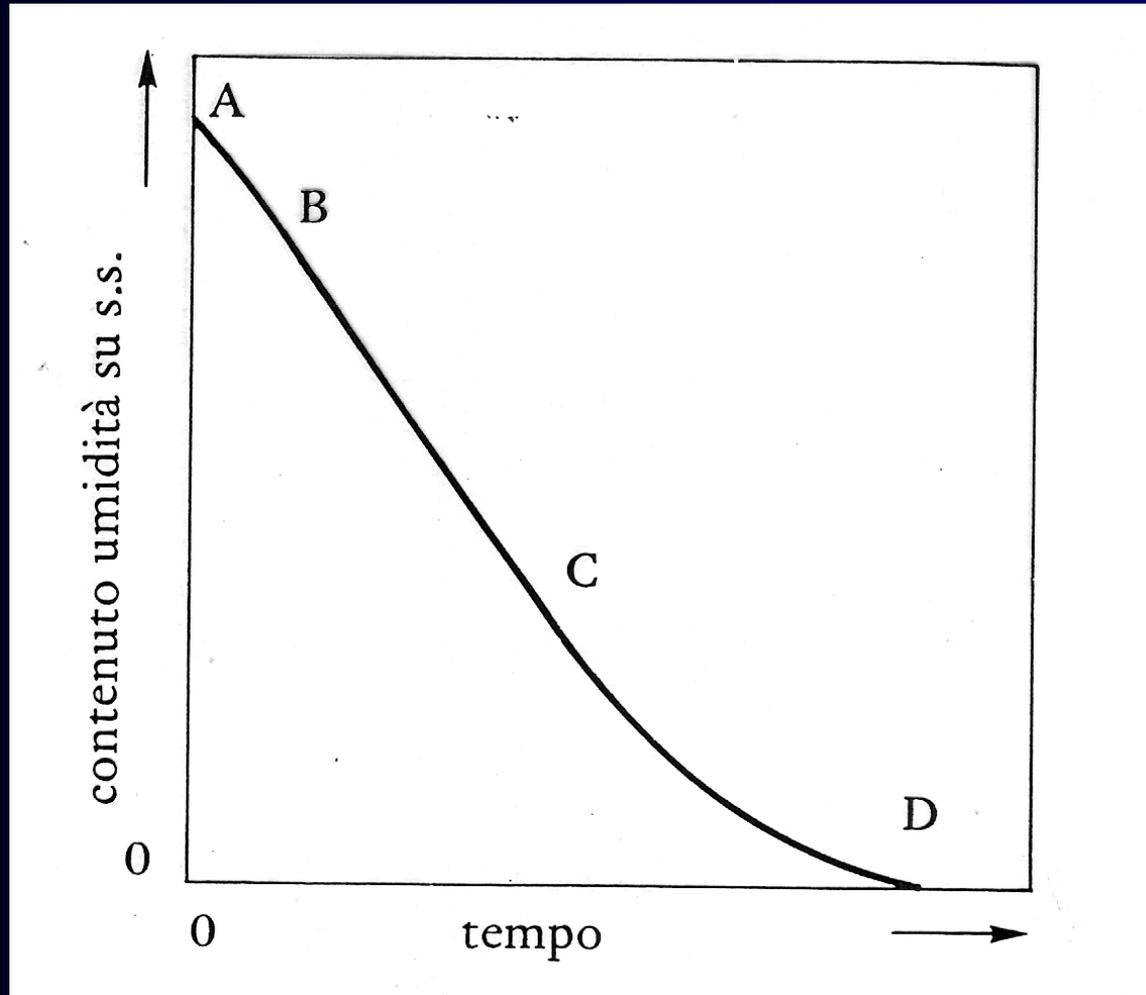
- temperatura
- umidità
- flusso del fluido essiccante (ad esempio, aria)
- disposizione del solido (superficie esposta rispetto al volume del materiale da essiccare)
- tipo di contatto fra superficie del solido umido e mezzo essiccante.

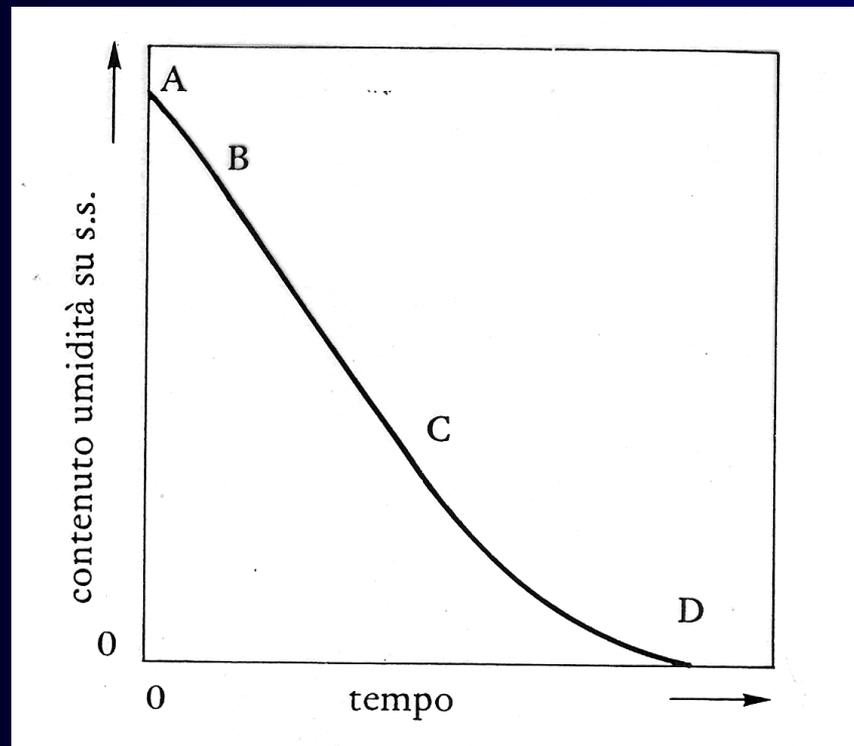


Dipendentemente dal tipo di processo e delle condizioni operative adottate, una variabile può risultare predominante.

## Andamento del processo

Un processo di essiccamento viene seguito riportando su di un diagramma il cambiamento del contenuto in acqua (W) rispetto al tempo.





(A-B) perdita di acqua per evaporazione da una superficie umida (come se fosse acqua pura).

(B-C) l'acqua si allontana da una superficie satura

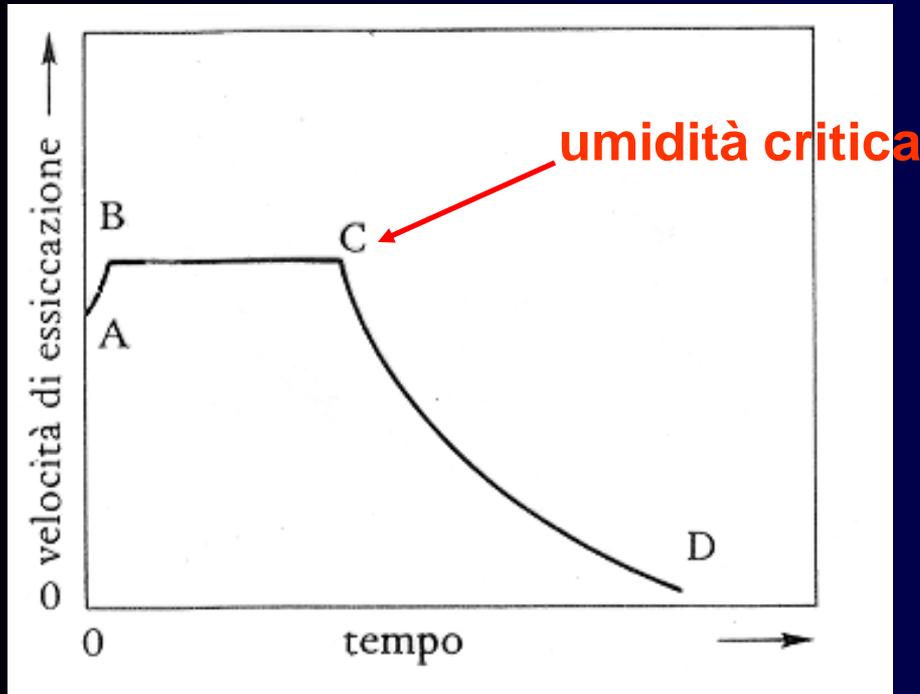
(C-D) l'acqua evapora all'interno del solido.



la velocità di essiccamento subisce profonde variazioni.

✧ Questo può essere messo in luce determinando la velocità istantanea costruendo il grafico "velocità istantanea  $dW/d\theta$  -tempo  $\theta$ "

Il valore di  $dW/d\theta$  può essere ottenuto dalla curva precedente misurando nei diversi punti il coefficiente angolare delle rette tangenti alla curva.



Si identificano due periodi in cui l'essiccamento procede con andamento nettamente diverso:

- PERIODO **B-C**: Essiccamento a velocità costante
- PERIODO **C-D**: Essiccamento a velocità decrescente.

il periodo **A-B**, inizio del processo, non riveste molta importanza essendo relativo alle condizioni esterne adottate.

Il punto **C** corrisponde al valore di **umidità critica**.

## *Velocità costante*

L'essiccamento procede per diffusione del vapore da :  
*superficie satura → film stagnante di aria → ambiente circostante.*

↯ l'acqua si muove all'interno del solido con una rapidità sufficiente a mantenere la superficie in condizioni di saturazione,

↯ la velocità di essiccamento è controllata dal transfer di calore sulla superficie evaporante → rimane a temperatura costante.

↯ La natura della matrice solida non influenza questa fase del processo.

↗ Il modo con cui viene fornito il calore condiziona la temperatura della superficie :

➤ Se il calore si trasferisce per convezione la temperatura della superficie si avvicina a quella del "bulbo umido".

➤ Quando il calore è fornito per conduzione mediante una superficie riscaldata, la temperatura del solido è più vicina al punto di ebollizione.



velocità di essiccamento molto più elevate rispetto alla convezione con aria a temperatura uguale a quella della superficie calda.

Quando il calore di evaporazione viene fornito da un gas caldo (aria), nel periodo a velocità costante si stabilisce un equilibrio fra :

- velocità del trasferimento del calore al materiale
- trasferimento di vapore rimosso dalla superficie:

$$dW/d\theta = h_t A \Delta t / d_s X L_e = K_g A \Delta P / d_s X$$

$dW/d\theta$  = velocità di essiccamento

$K_g$  = coeff. di transfer di massa

$h_t$  = coeff. globale di trasferimento

$d_s$  = densità

$A$  = superficie

$X$  = spessore

$L_e$  = calore latente di evaporazione

$\Delta t$  gradiente di temperatura tra :

- temperatura del gas (bulbo secco);
- temperatura della superficie evaporante (bulbo umido)

$\Delta P$  gradiente di pressione tra :

- tensione di vapore dell'acqua alla temperatura della superficie evaporante;
- tensione di vapore dell'acqua nell'aria.

➤ La velocità di essiccamento, nel periodo a velocità costante dipende quindi da:

- coefficienti di trasferimento di calore e di massa;
- area esposta al mezzo essiccante;
- differenza di temperatura o di umidità fra la corrente d'aria e la superficie umida del solido.
- spessore
- densità

## *Valutazione della velocità costante*

↗ L'analisi del processo nel periodo a velocità costante, viene effettuata di norma attraverso lo studio del transfer di calore



piccoli errori nelle misure della temperatura non conducono a gravi errori nella determinazione della quantità di calore interessata



mentre portano a gravi errori nella valutazione delle pressioni parziali



quindi nella valutazione della massa trasferita o del coefficiente di trasferimento.

➤ Una volta che l'umidità del solido abbia raggiunto il valore critico inizia il periodo d'essiccamento a velocità decrescente.

⇨ l'umidità finale può trovarsi ad un livello superiore di quello critico



tutto il processo si svolge a velocità costante

⇨ Se invece è l'umidità iniziale che si trova al di sotto dell'umidità critica



il processo si svolge tutto a velocità decrescente.

Nel periodo di essiccamento a velocità decrescente i meccanismi che condizionano il processo sono



**trasferimenti di massa e di calore all'interno del materiale.**

➤ Per spessori piccoli rispetto all'area superficiale e per tempi di essiccamento relativamente lunghi :

$$dW/d\theta = \pi^2 D' (W - W_e) / 4X^2$$

*dove:*

*$dW/d\theta$  = velocità di essiccamento:*

*$W$  = contenuto medio in  $H_2O$  del secco ad un certo istante:*

*$W_e$  = umidità di equilibrio con l'esterno (umidità finale).*

*$D'$  = diffusività del liquido*

*$X$  = spessore*

➤ velocità direttamente proporzionale alla :

- diffusività del materiale
- al contenuto in acqua libera

➤ inversamente proporzionale al :

- quadrato dello spessore del prodotto.

Integrando la precedente espressione tra gli estremi  $W_0$  (umidità iniziale) e  $W$ , la durata dell'essiccamento risulta :

$$\theta = (4X^2 / \pi^2 D') \ln (W_0 - W_e) / (W - W_e)$$

✧ La durata del processo proporzionale al :

- quadrato dello spessore.

✧ L'espressione indica inoltre che teoricamente l'umidità media  $W$  raggiungerà il valore di equilibrio con l'esterno solo dopo un tempo infinito.

# ESSICCATOI

➤ Di norma l'essiccamento viene preceduto da operazioni di preconcentrazione



riduzione del contenuto in acqua libera che deve essere allontanata (per latte, caffè, succhi di frutta, ecc., la preconcentrazione avviene per evaporazione).

➤ Per gli alimenti che si presentano sotto forma di particelle disperse in un mezzo acquoso, l'essiccamento è invece preceduto da operazioni di separazione meccanica

L'essiccamento di un prodotto umido presuppone due operazioni fondamentali :

- 1) Somministrazione di calore
- 2) Rimozione del vapore generato.

**N.B.** Il calore può essere fornito al materiale facendo lambire la superficie della sostanza umida da una corrente d'aria calda.



la stessa aria che provvede a rimuovere il vapor d'acqua

Le principali grandezze che regolano l'operazione sono:

- superficie lambita → *deve essere la più elevata possibile*
  - temperatura dell'aria: con ↑ temperatura ↑ la quantità di calore fornita al prodotto e quindi la velocità di essiccamento
  - velocità dell'aria: con ↑ velocità ↑ lo scambio termico e l'evaporazione
  - pressione di esercizio: operando a bassa pressione ↑ l'evaporazione
  - umidità dell'aria: ↓ a quella del solido.
- ✧ Se il calore viene fornito per mezzo di una parete di scambio l'apparato deve essere *provvisto di un sistema per la rimozione del vapore.*

# CLASSIFICAZIONE ESSICCATOI

In base a fattori discriminanti

## *Somministrazione del calore:*

- processo a temperatura ambiente
- mediante riscaldamento
- per circolazione di gas caldo

## *Natura del ciclo:*

- a ciclo continuo
- a ciclo discontinuo

## *Direzione del fluido riscaldante:*

- in equicorrente
- in controcorrente

## *Natura del prodotto:*

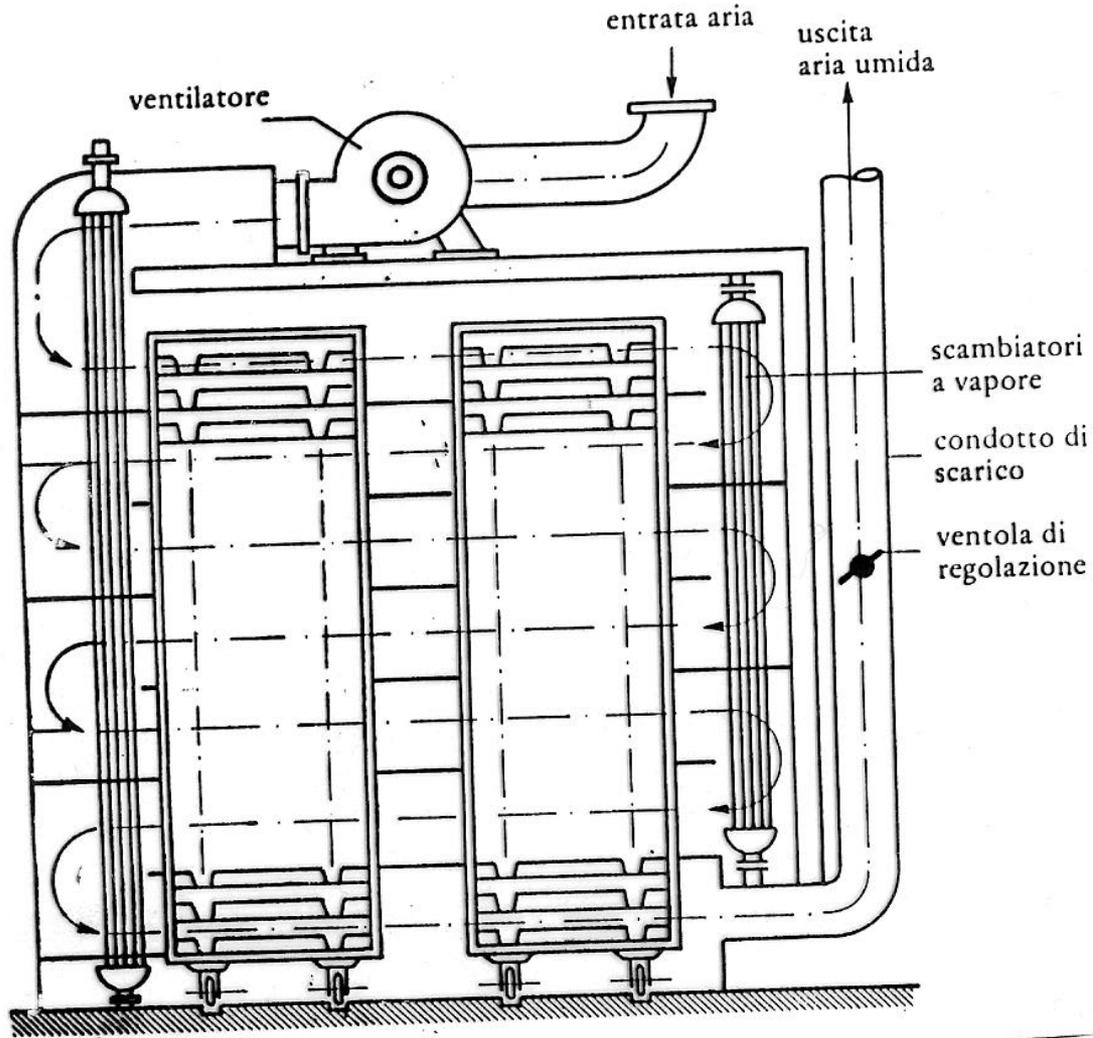
- solidi granulari inamovibili
- solidi granulari movibili (considerati come fluidi)

## *Pressione di esercizio:*

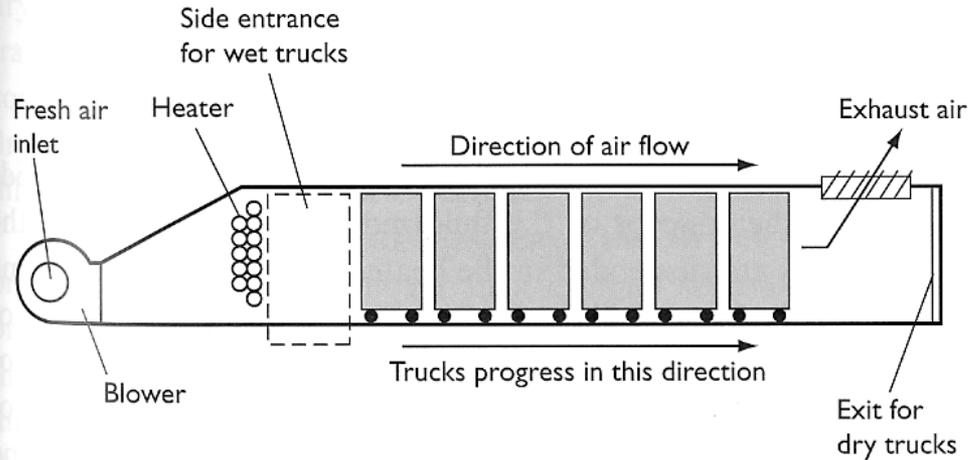
- a pressione atmosferica
- a bassa pressione (evaporazione)
- sotto vuoto spinto (sublimazione).

**ESSICCATOI PER MATERIALI  
POSTI A CONTATTO CON  
SUPERFICI SOLIDE**

# ESSICCATOI AD ARMADIO

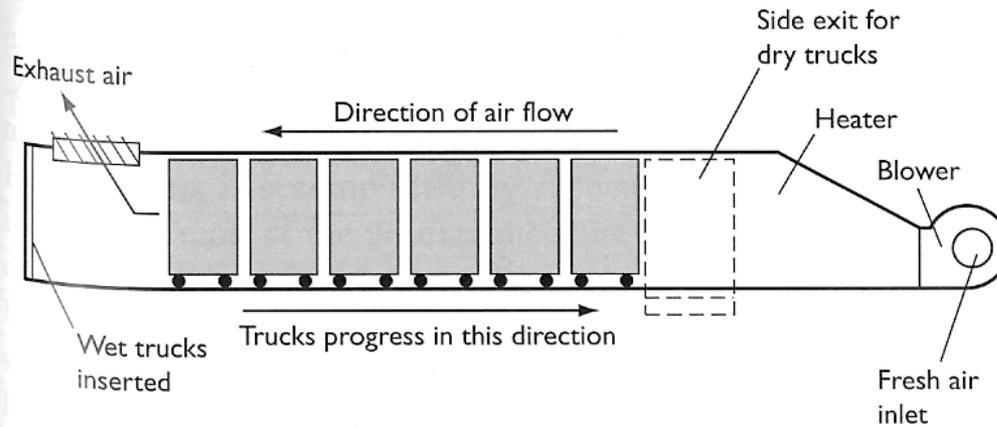


# ESSICCATOI A TUNNEL



W

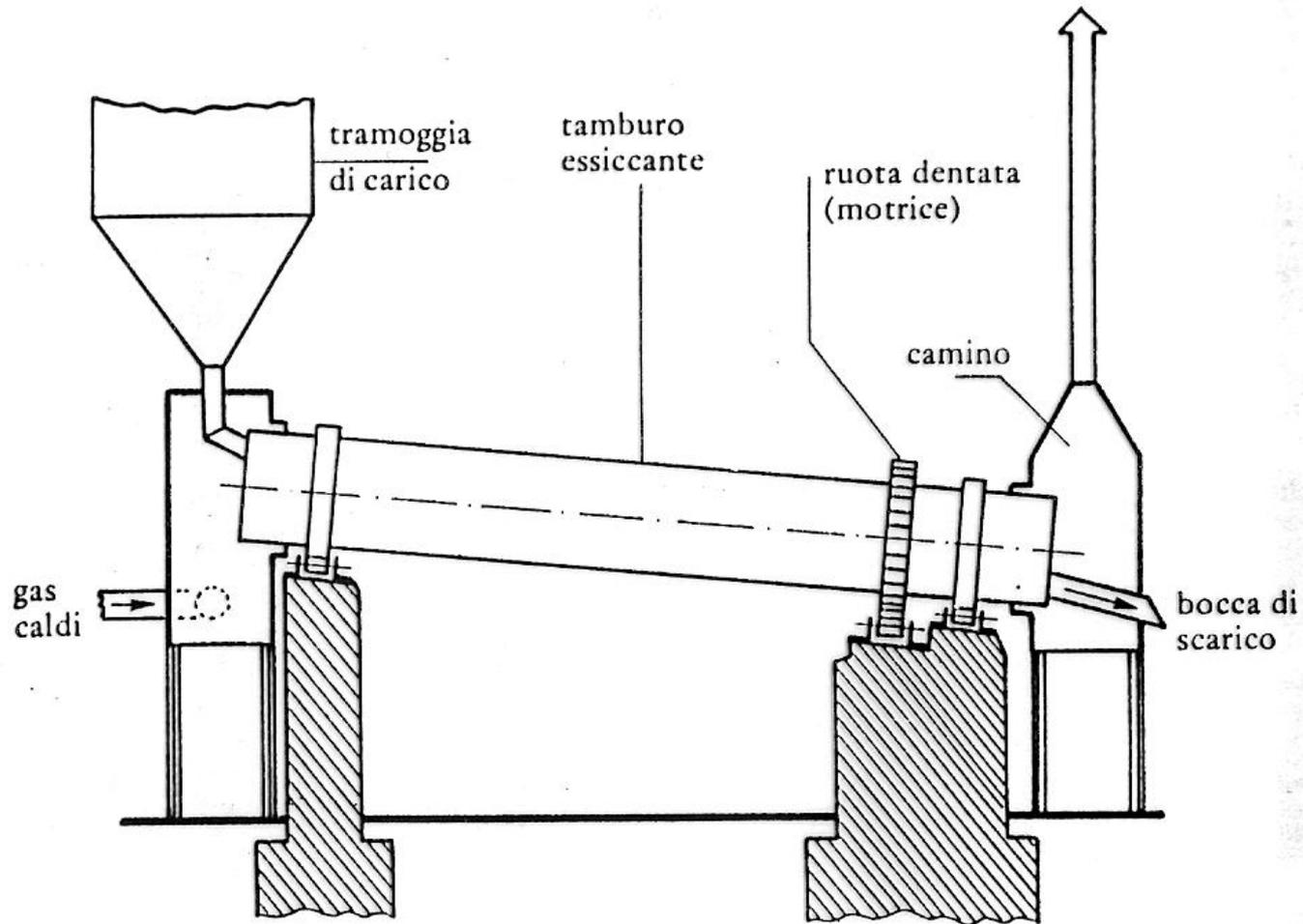
**Figure 12.6** Schematic illustration of a concurrent-flow tunnel dryer. (From Van Arsdel, 1951.)



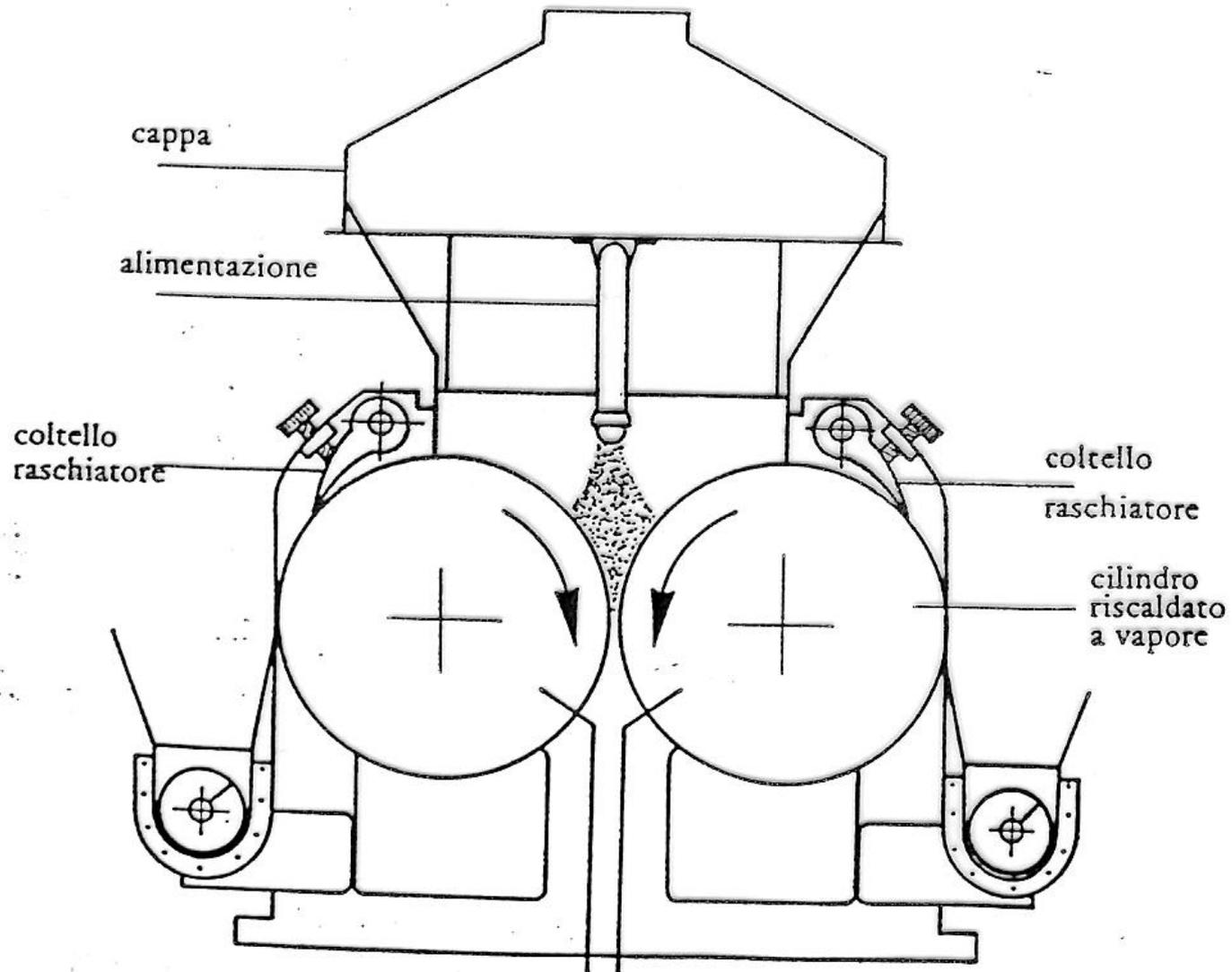
W

**Figure 12.7** Schematic illustration of a countercurrent-flow tunnel dryer. (From Van Arsdel, 1951.)

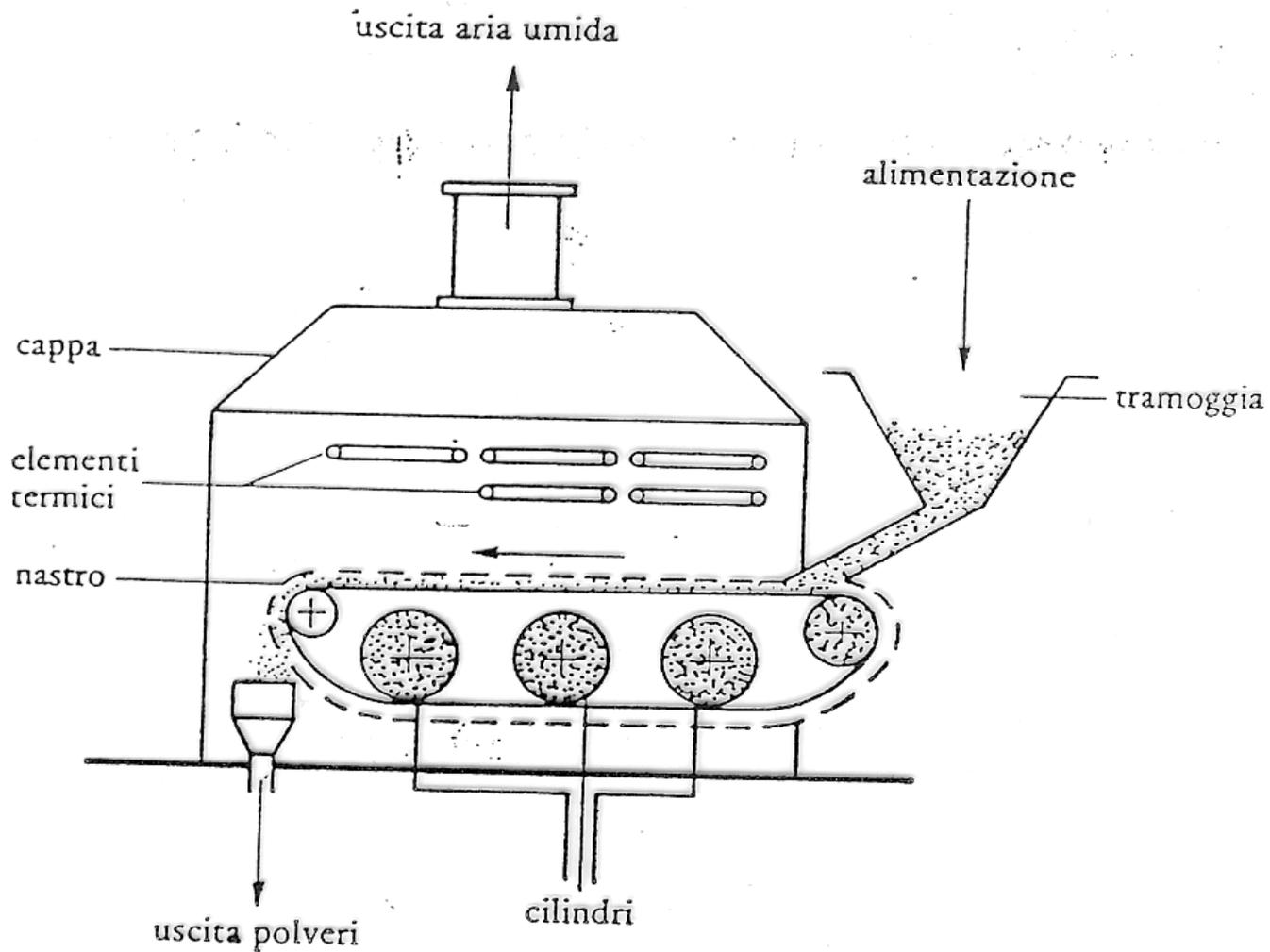
# ESSICCATOI A TAMBURO ROTANTE



# ESSICCATOI A CILINDRI



# ESSICCATOI A NASTRI



# ESSICCATOI PER MATERIALI SOSPESI IN UN FLUIDO

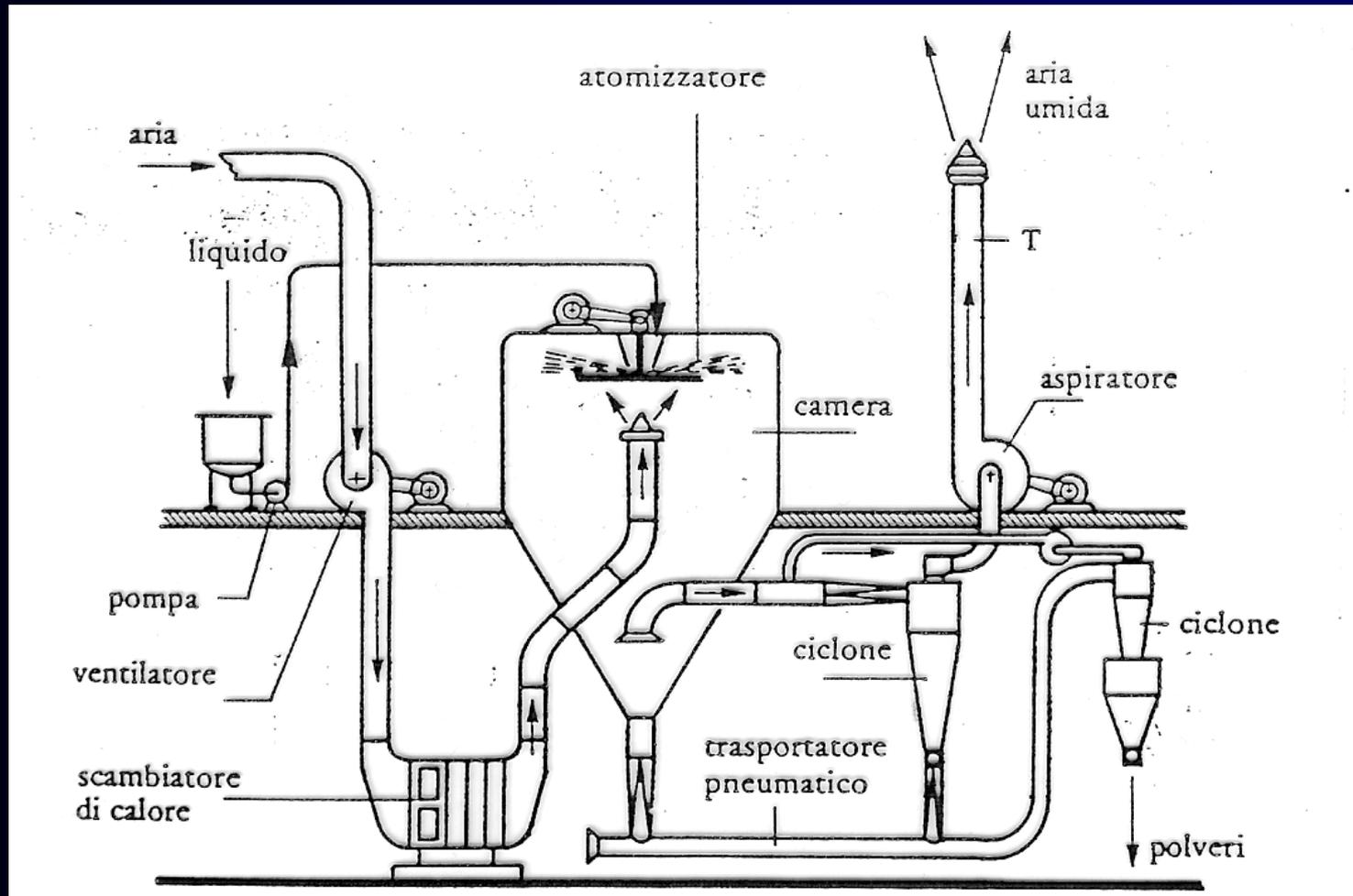
In questi apparecchi il materiale, *gocce o granuli*, viene essiccato per contatto con una corrente di fluido riscaldato (es. aria calda).



Le particelle sono disidratate mentre si trovano "sospese" nella corrente del fluido essiccante.

# SPRAY-DRYING

Il sistema spray, detto anche atomizzazione, è forse il più diffuso nell'essiccamento industriale dei prodotti liquidi.



*latte, siero di latte, concentrati proteici, caffè, tè, succhi di frutta,...*

Il liquido da essiccare  
dal serbatoio di alimentazione  
passa all' atomizzatore



**polverizzazione del liquido**  
*all'interno della camera*

Nella camera di essiccazione  
entra una corrente di aria  
( filtrata e riscaldata 100-250 °C)



Le “goccioline” per gravità cadono verso il fondo dell'apparecchio.



*Durante il periodo di caduta il contatto con l'aria calda permette la  
rimozione praticamente totale dell'acqua*



Sul fondo si raccolgono le polveri e la stessa corrente d'aria (umida)  
provvede a trasportare il materiale secco verso l'esterno.



Un ciclone separatore permette di separare le polveri dall'aria umida  
( 80-100°C)

Nella camera di essiccazione le goccioline, prodotte con una certa distribuzione dimensionale, si essiccano nella caduta per contatto con l'aria calda. Durante questo tempo la particelle più grandi, ancora umide, scontrandosi con altre possono formare aggregati



agglomerazione primaria

Le polveri fini vengono reimmesse nella camera all'altezza dell'atomizzatore così da entrare in contatto con le goccioline appena atomizzate



agglomerazione secondaria



buona proprietà di dispersione e quindi di ricostituibilità

**ISTANTANEIZZATORE** (per riumidificazione) → impianto posto dopo l'essiccatore spray → permette di ottenere un prodotto con ottime caratteristiche di disperdibilità

# ESSICCATOI A LETTO FLUIDO

