

□ Essiccamento

OPERAZIONI UNITARIE CON APPLICAZIONI

Prof. Maria Martuscelli

Il anno - CdS di Viticoltura ed Enologia
Facoltà di Bioscienze

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

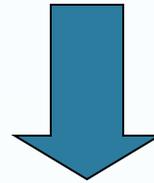


L'acqua è il mezzo fondamentale in cui si svolgono tutte le più importanti reazioni chimiche, enzimatiche e microbiologiche responsabili delle alterazioni.

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

- L'aria umida è una **miscela binaria di aria secca e vapore**
- Il vapore d'acqua presente nell'aria è vapore surriscaldato a bassa pressione e temperature.
- Le molecole di acqua (vapore) presenti nella miscela aria-vapore, esercitano una pressione sul Sistema, analogamente ai gas.
- Le miscele aria-vapore seguono le leggi fondamentali dei gas per pressioni totali fino a 3 atm (buona approssimazione)
- Per le miscele aria-vapore a P_{atm} si applica la legge di Gibbs-Dalton

$$P_B = p_a + p_w$$

Dove:

P_B =pressione barometrica dell'aria (P totale aria umida)

P_a =pressione parziale dell'aria esercitata dall'aria secca

P_w = pressione parziale dell'aria esercitata dal vapore

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 :

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

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

Umidità relativa percentuale:

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

$$\text{R.H. \%} = 100 P_w / P_{ws}$$

Punto di rugiada

temperatura alla quale una data miscela di vapor d'acqua e aria diventa satura → inizia il processo di condensazione
(Temperatura del punto di rugiada).

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)

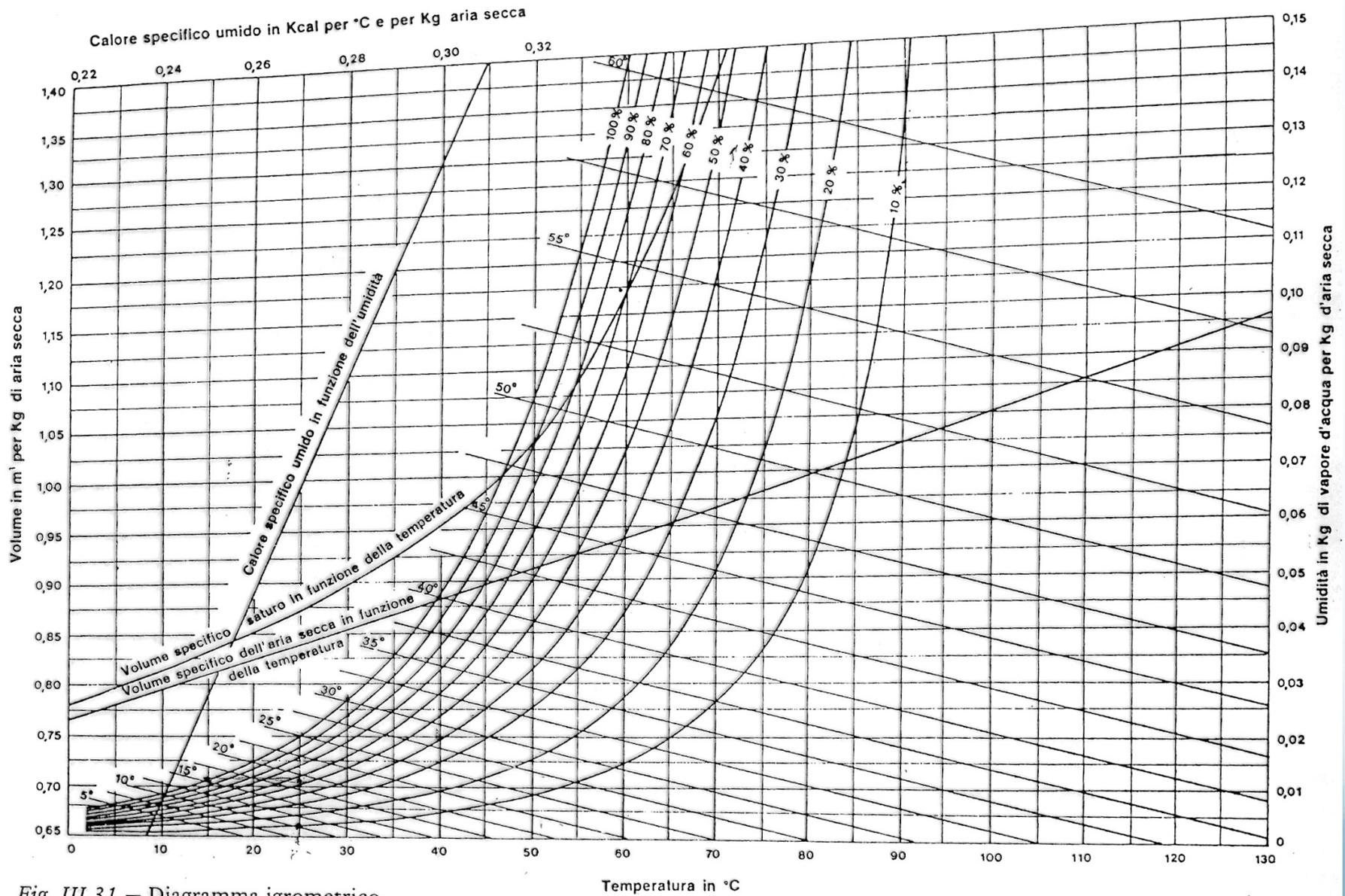
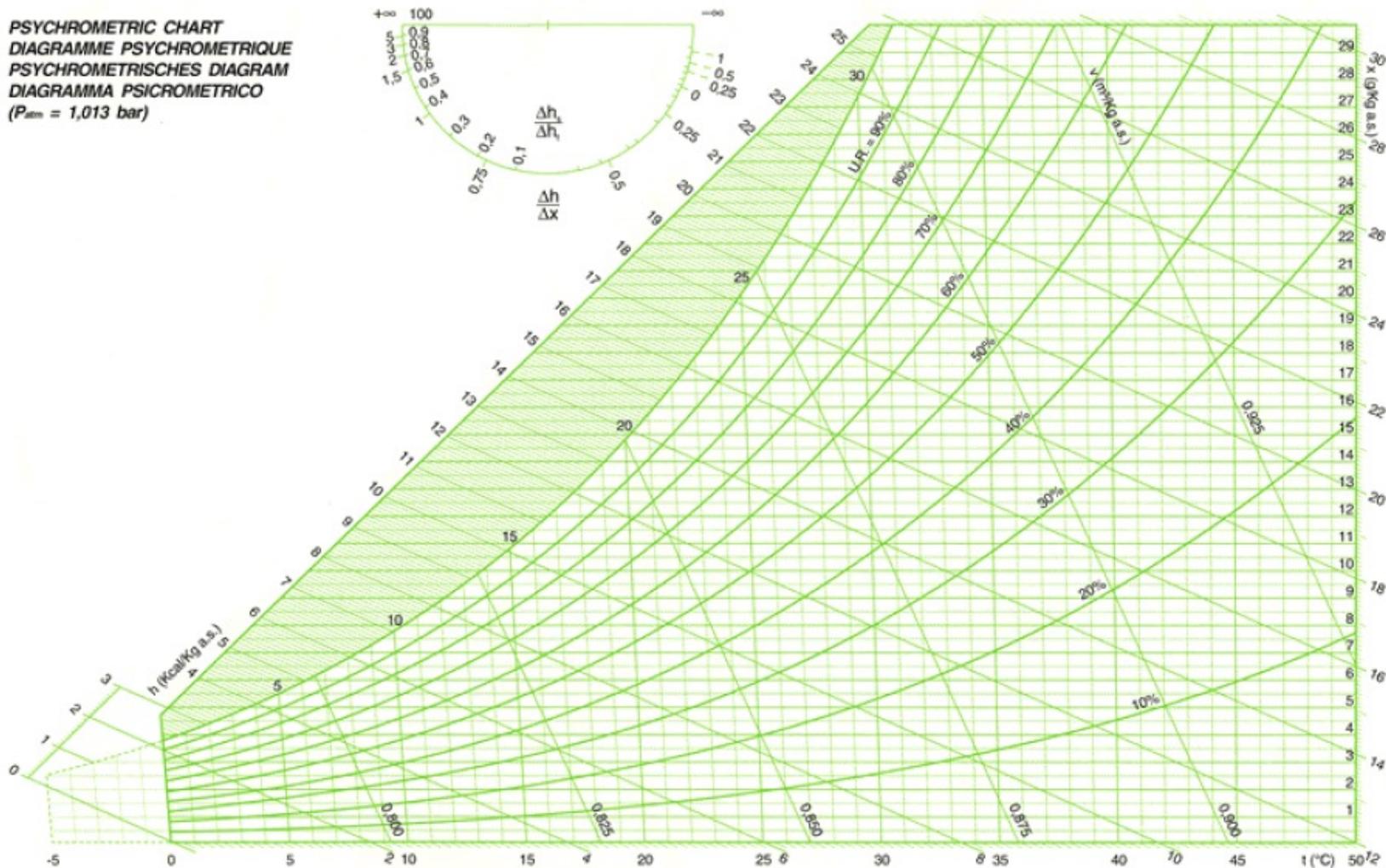


Fig. III.31 – Diagramma igrometrico.

PSYCHROMETRIC CHART
 DIAGRAMME PSYCHROMETRIQUE
 PSYCHROMETRISCHES DIAGRAM
 DIAGRAMMA PSICROMETRICO
 ($P_{atm} = 1,013 \text{ bar}$)



Su tale diagramma abbiamo la possibilità di individuare tutte le grandezze termoigrometriche dell'aria da trattare:

- Temperatura a bulbo secco;
- Umidità specifica;
- Umidità relativa;
- Temperatura a bulbo umido;

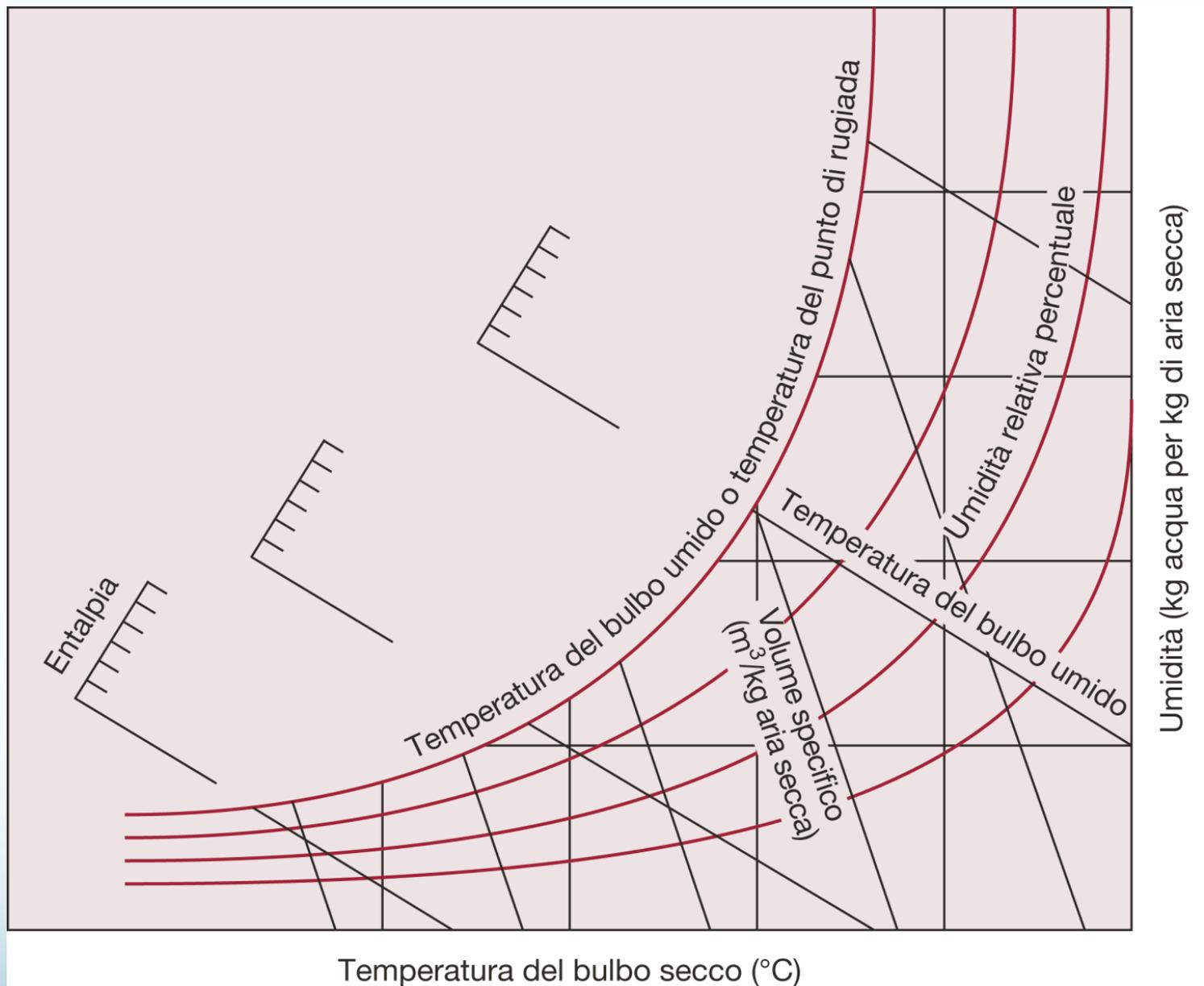


Figura 7.2 Diagramma psicrometrico semplificato. (Singh & Heldmann, 2015)

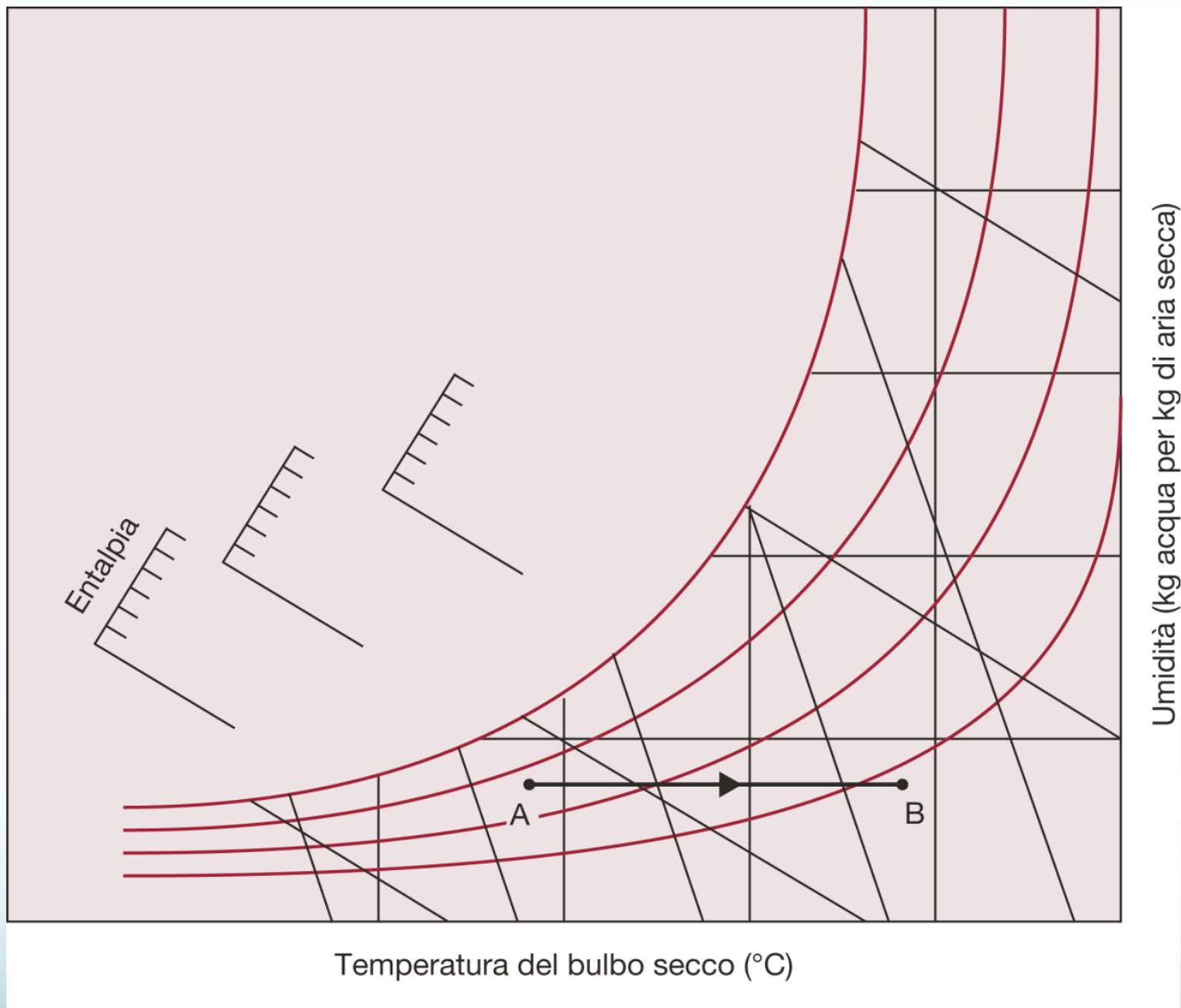


Figura 7.3 Processo di riscaldamento A-B mostrato sul diagramma psicrometrico.

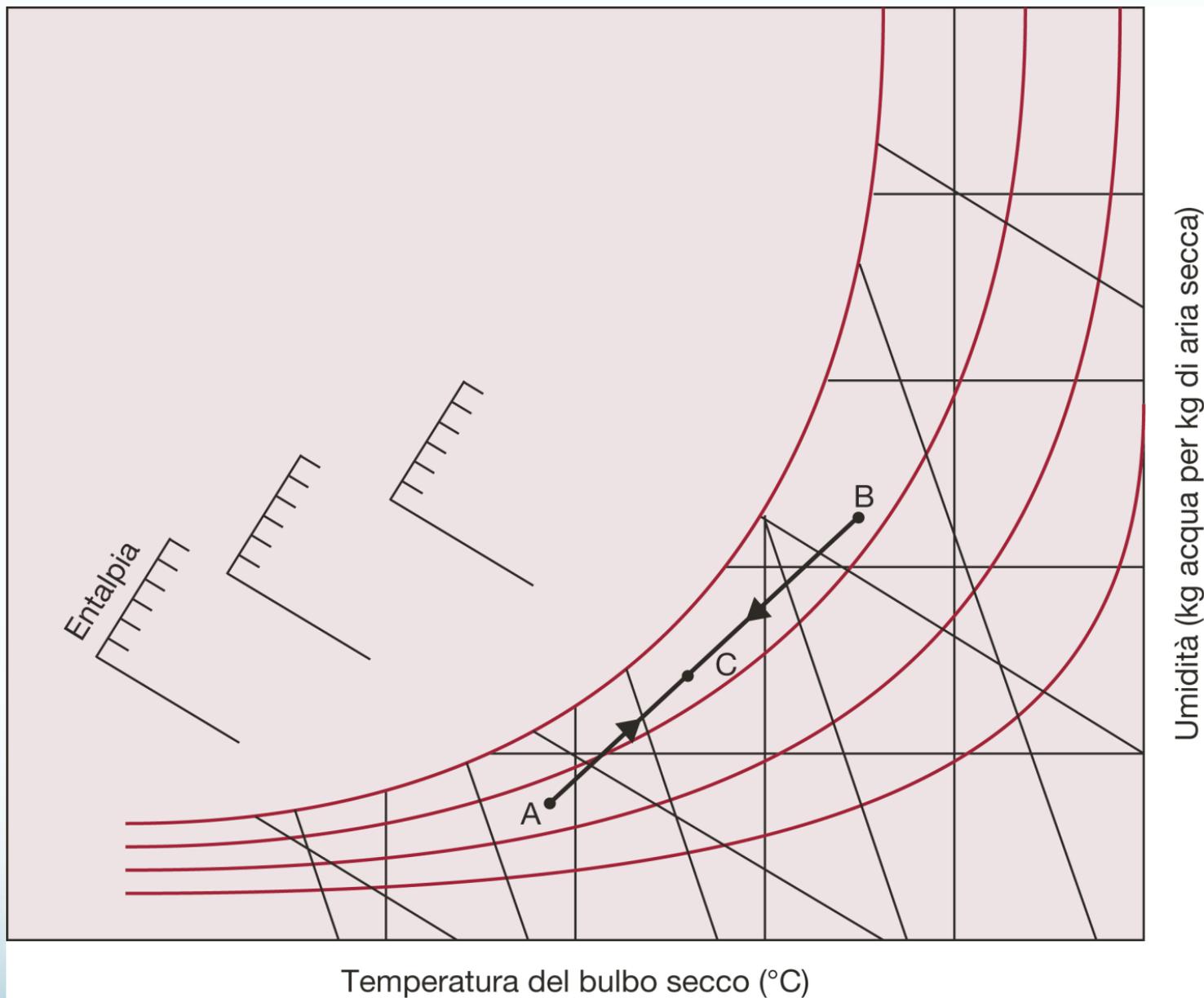


Figura 7.4 Miscelazione di aria in parti uguali mostrata su un diagramma psicrometrico.

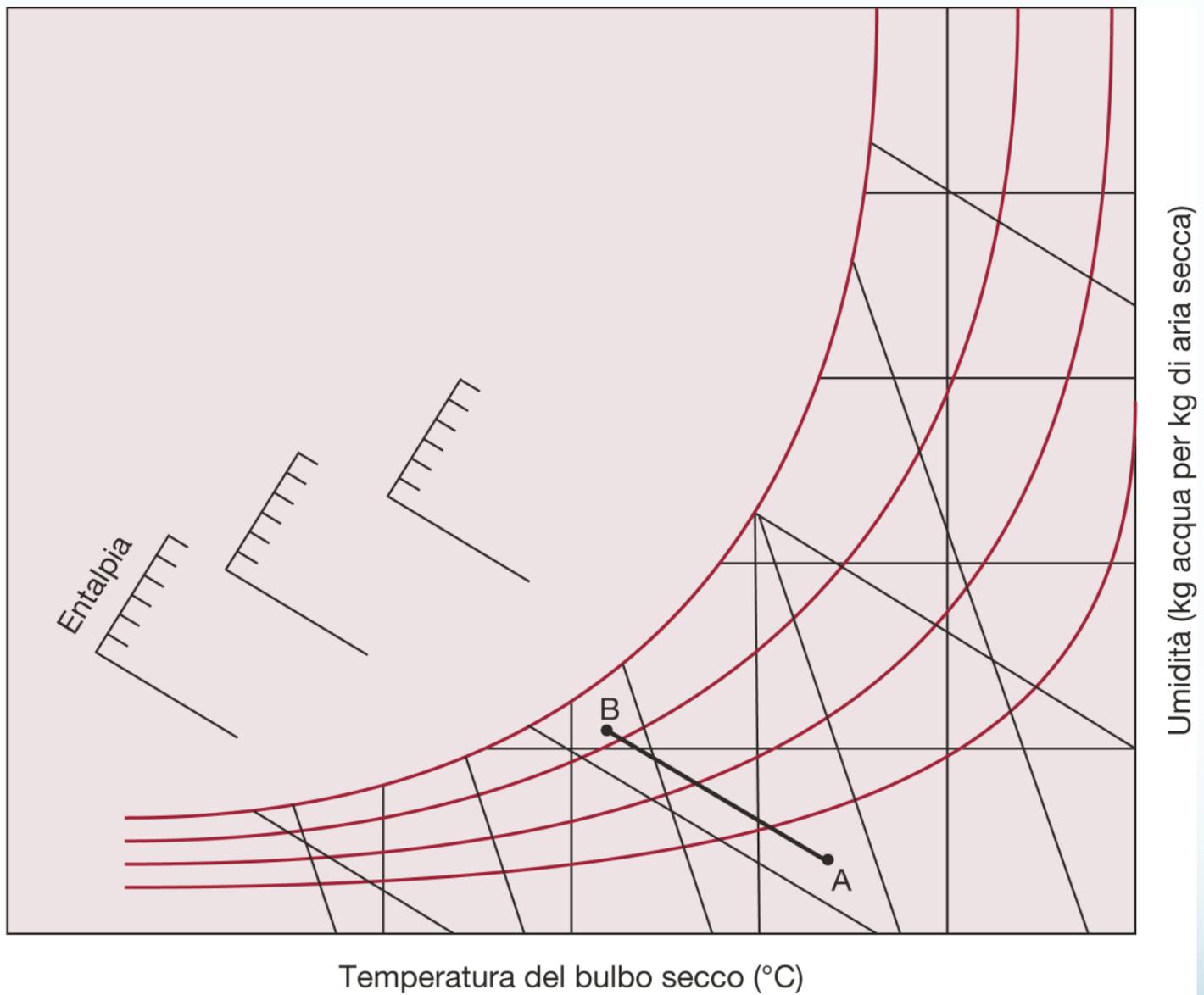


Figura 7.5 Processo di essiccamento (o saturazione adiabatica) mostrato su un diagramma psicrometrico.

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 (H_s)
- Per ogni valore di H , si può calcolare 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° C
2. La temperatura di bulbo umido alle stesse condizioni;
3. l'R.H. di aria con temperatura del bulbo umido di 45° C e quella di bulbo secco di 75° C ;
4. punto di rugiada di aria raffreddata adiabaticamente da una temperatura di bulbo secco di 55° C e un R.H.% del 30 ;
5. il cambiamento di R.H.% di aria con temperatura del bulbo umido di 39° C riscaldata da una temperatura di bulbo secco di 50° C ad una di 86° C ;
6. il cambiamento di R.H.% di aria con temperatura del bulbo umido di 35° C raffreddata adiabaticamente da una temperatura di bulbo secco di 70° C ad una di 40° 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

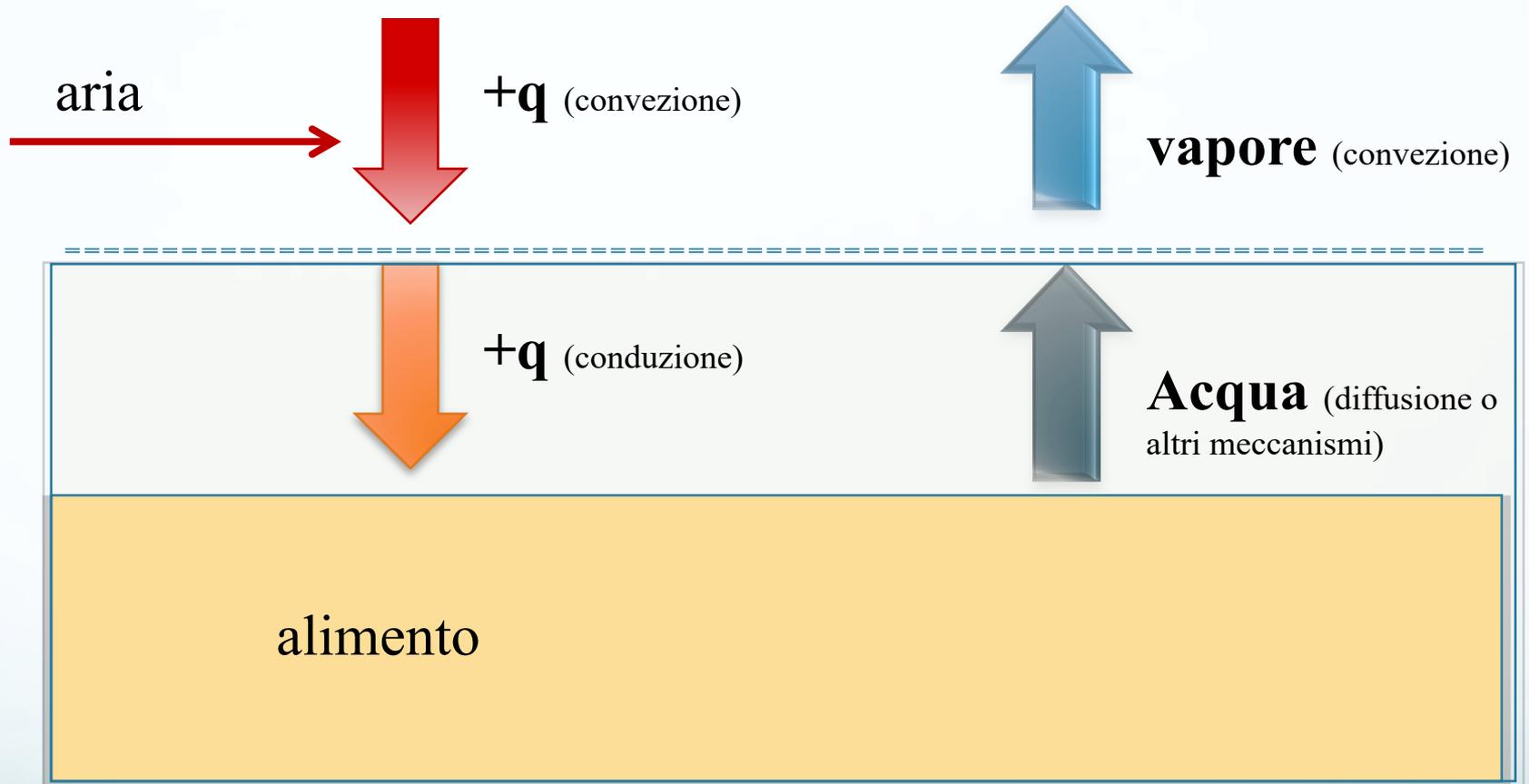
Durante l'essiccamento di un solido si sviluppano simultaneamente due processi fondamentali:

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.

cosa avviene durante l'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.**

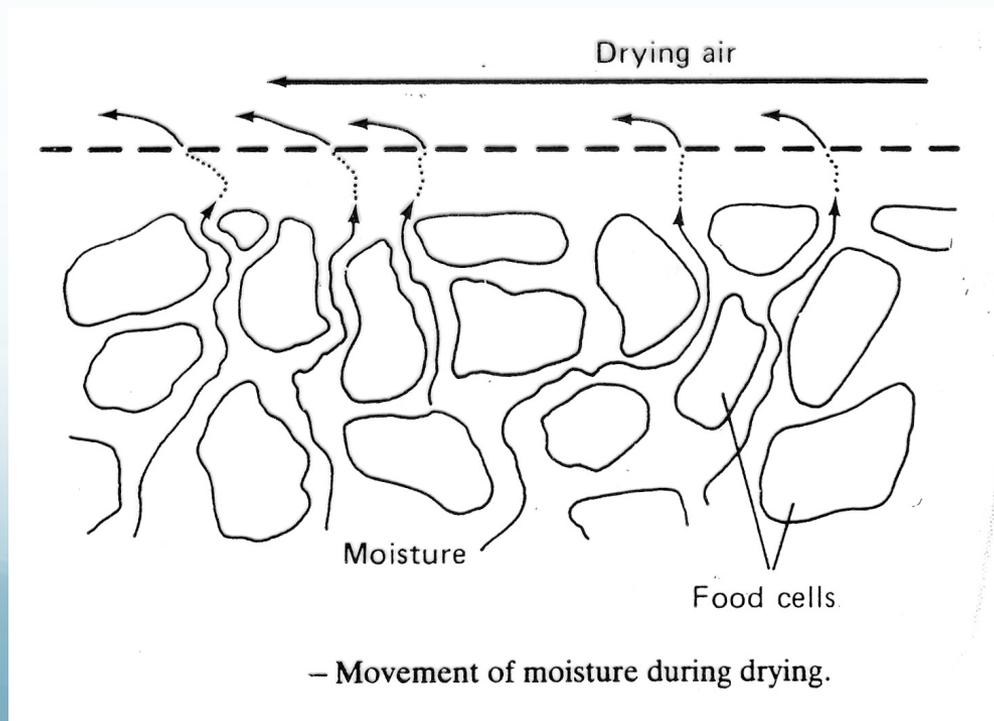
⇨ Può svilupparsi in qualsiasi solido dove

- 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, tessili, 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

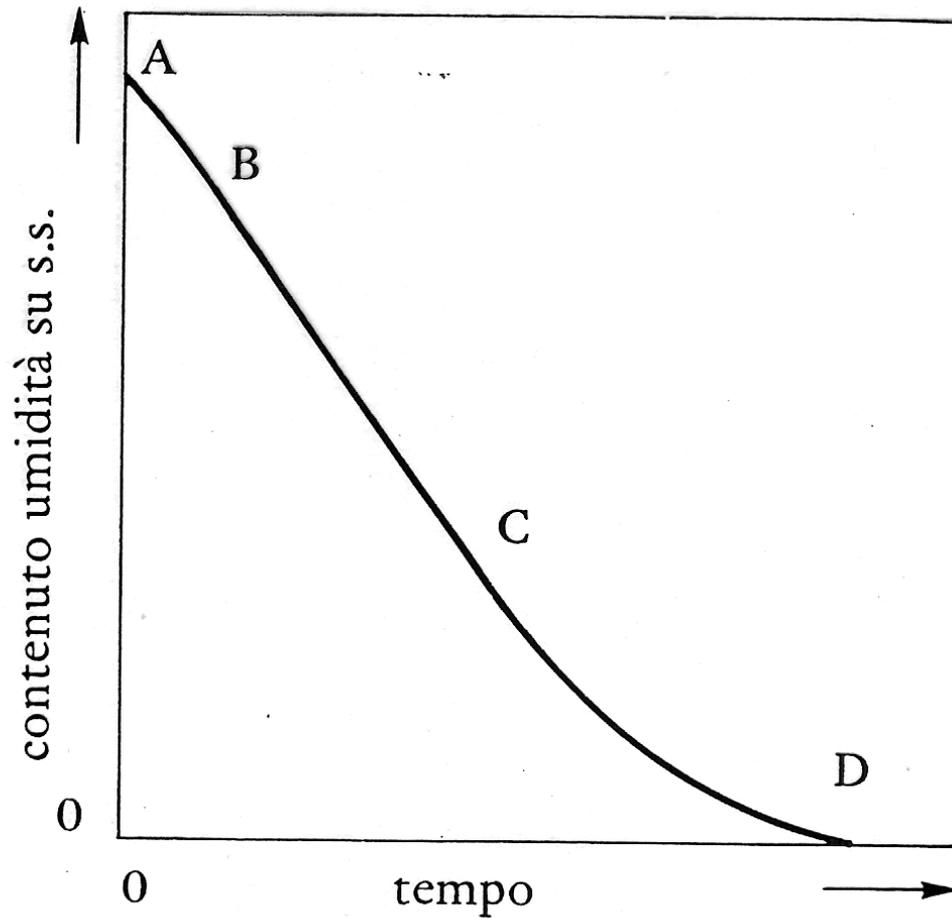
- temperatura
- umidità
- flusso del fluido essiccante (ad esempio, aria)
- disposizione del solido (superficie esposta rispetto al volume del materiale da essiccare)
- tipo di contatto fra superficie del solido umido e mezzo essiccante.

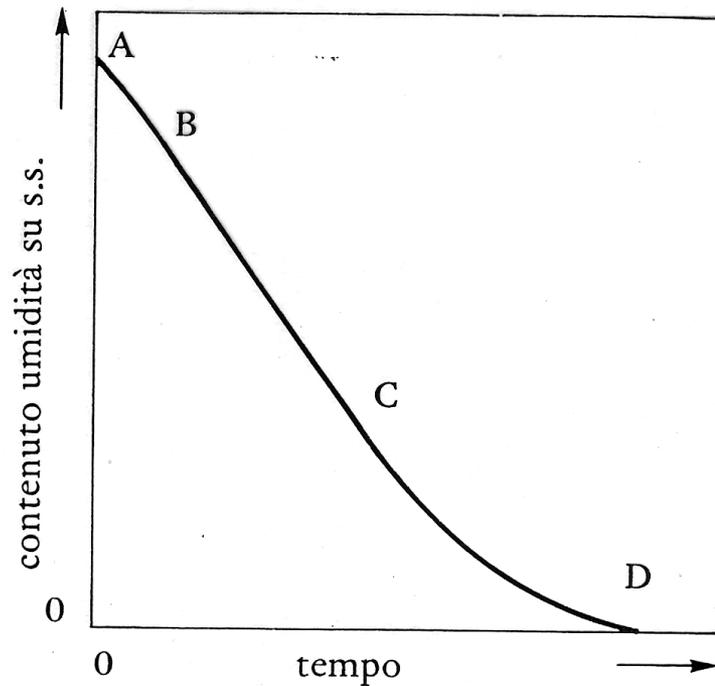


Dipendentemente dal tipo di processo e delle condizioni operative adottate, una variabile può risultare predominante.

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

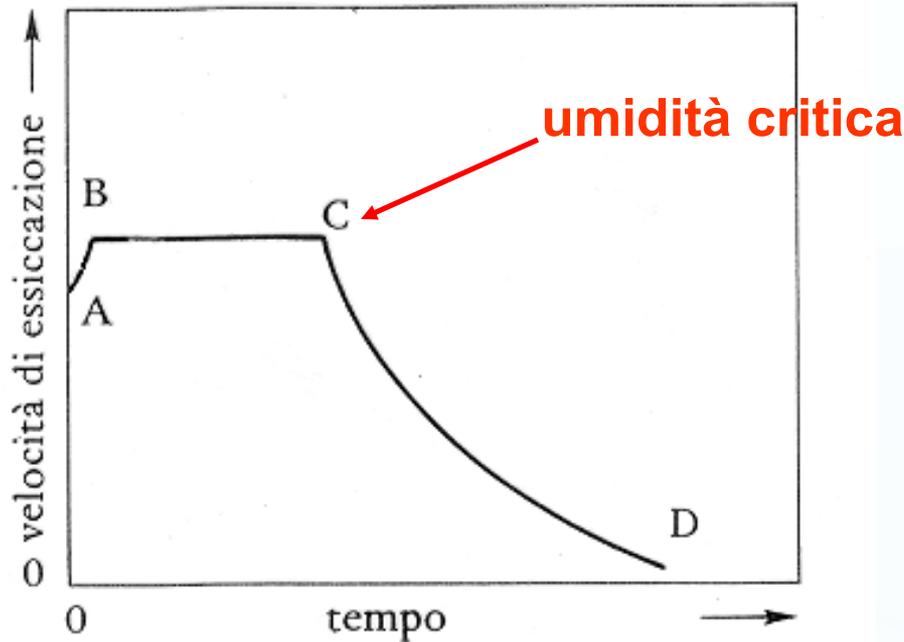
(C-D) l'acqua evapora all'interno del solido.



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 θ "

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:

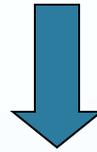
- PERIODO **B-C**: Essiccamento a velocità costante
- PERIODO **C-D**: Essiccamento a velocità decrescente (andamento rallentato).

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**.

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:

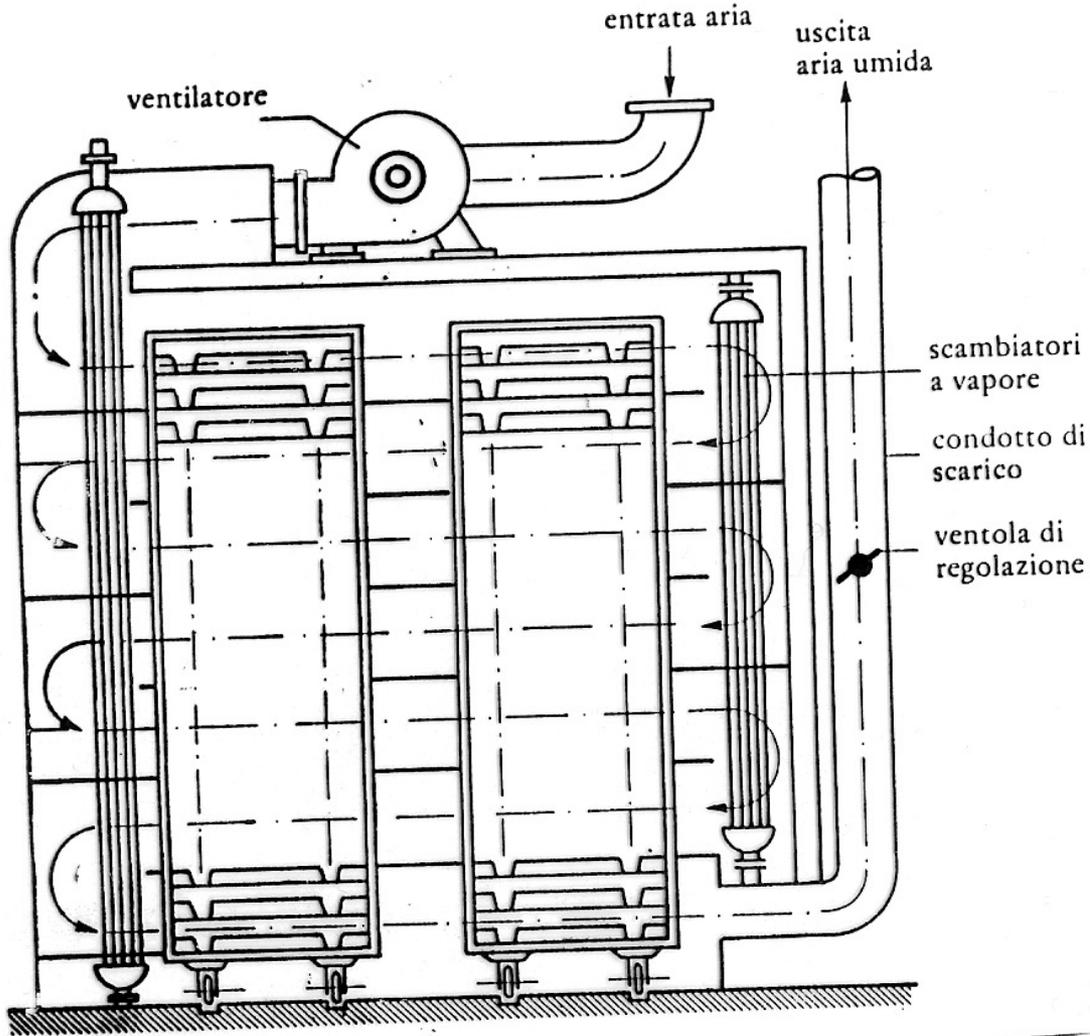
- “ solidi granulari inamovibili
- “ solidi granulari movibili (considerati come fluidi)

Pressione di esercizio:

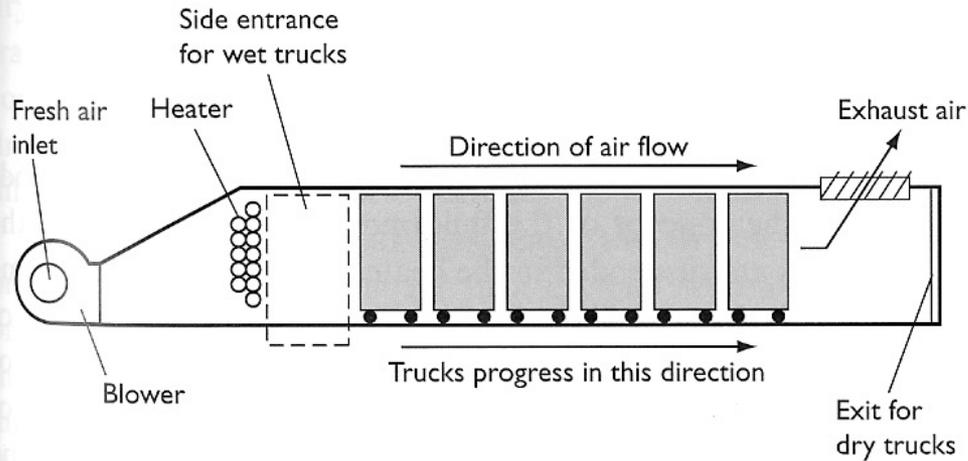
- “ a pressione atmosferica
- “ a bassa pressione (evaporazione)
- “ sotto vuoto spinto (sublimazione).

ESSICCATOI PER MATERIALI POSTI A CONTATTO CON SUPERFICI SOLIDE

ESSICCATOI AD ARMADIO

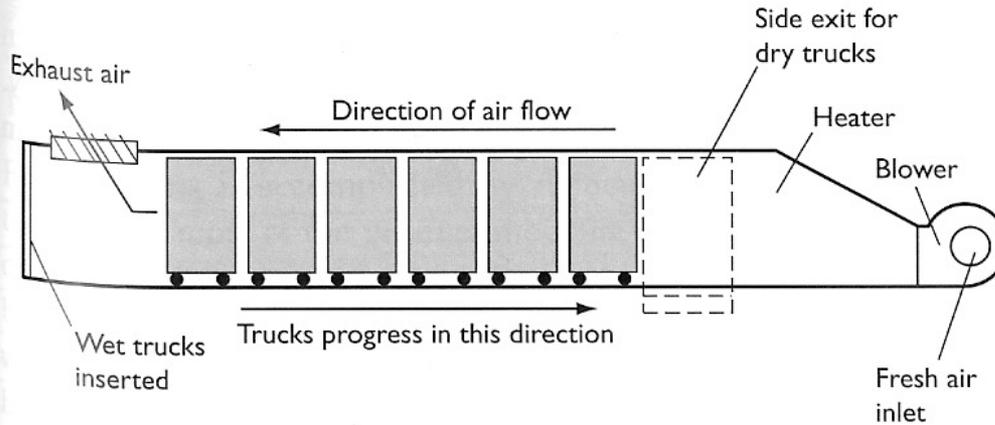


ESSICCATOI A TUNNEL



W

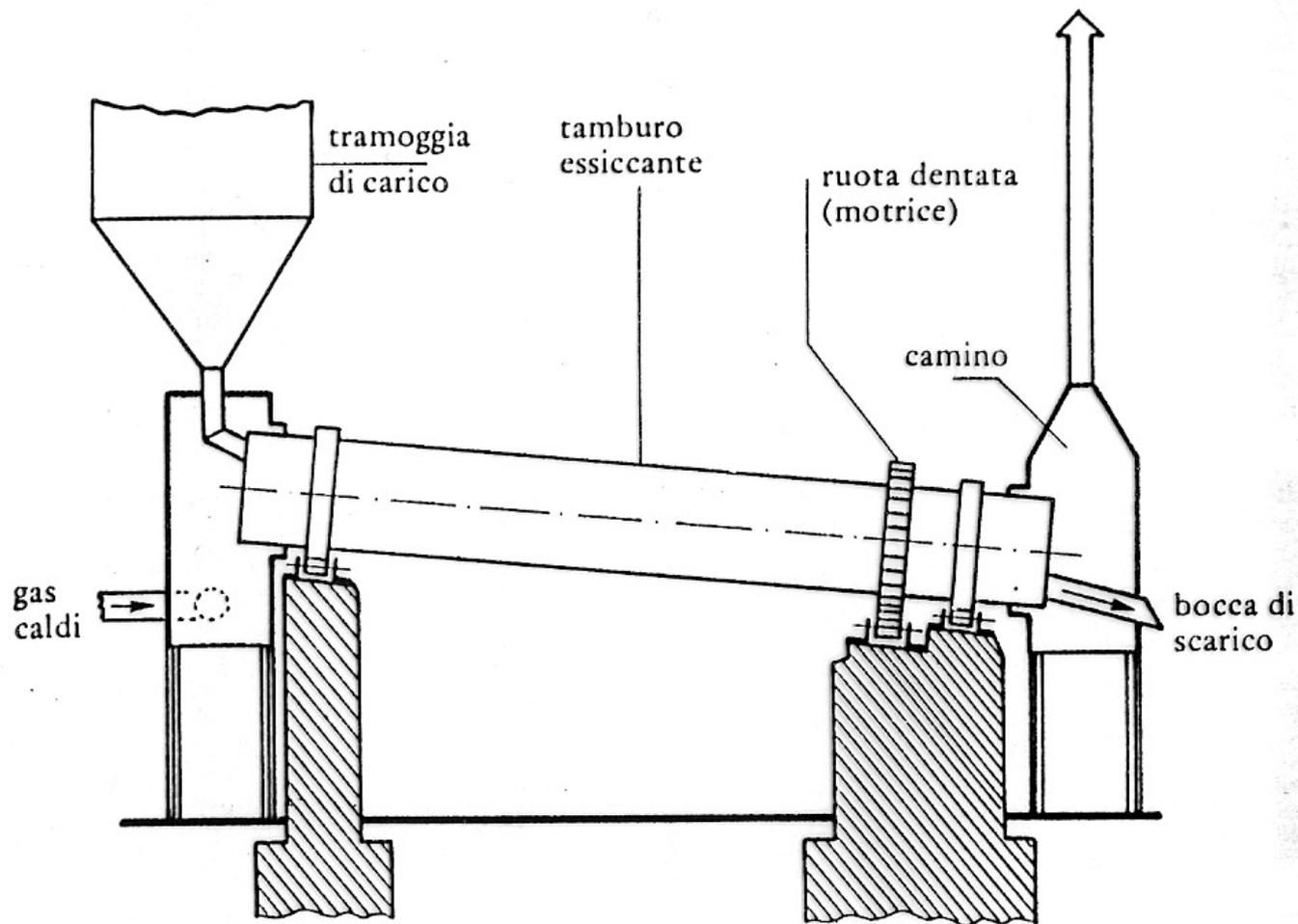
Figure 12.6 Schematic illustration of a concurrent-flow tunnel dryer. (From Van Arsdel, 1951.)



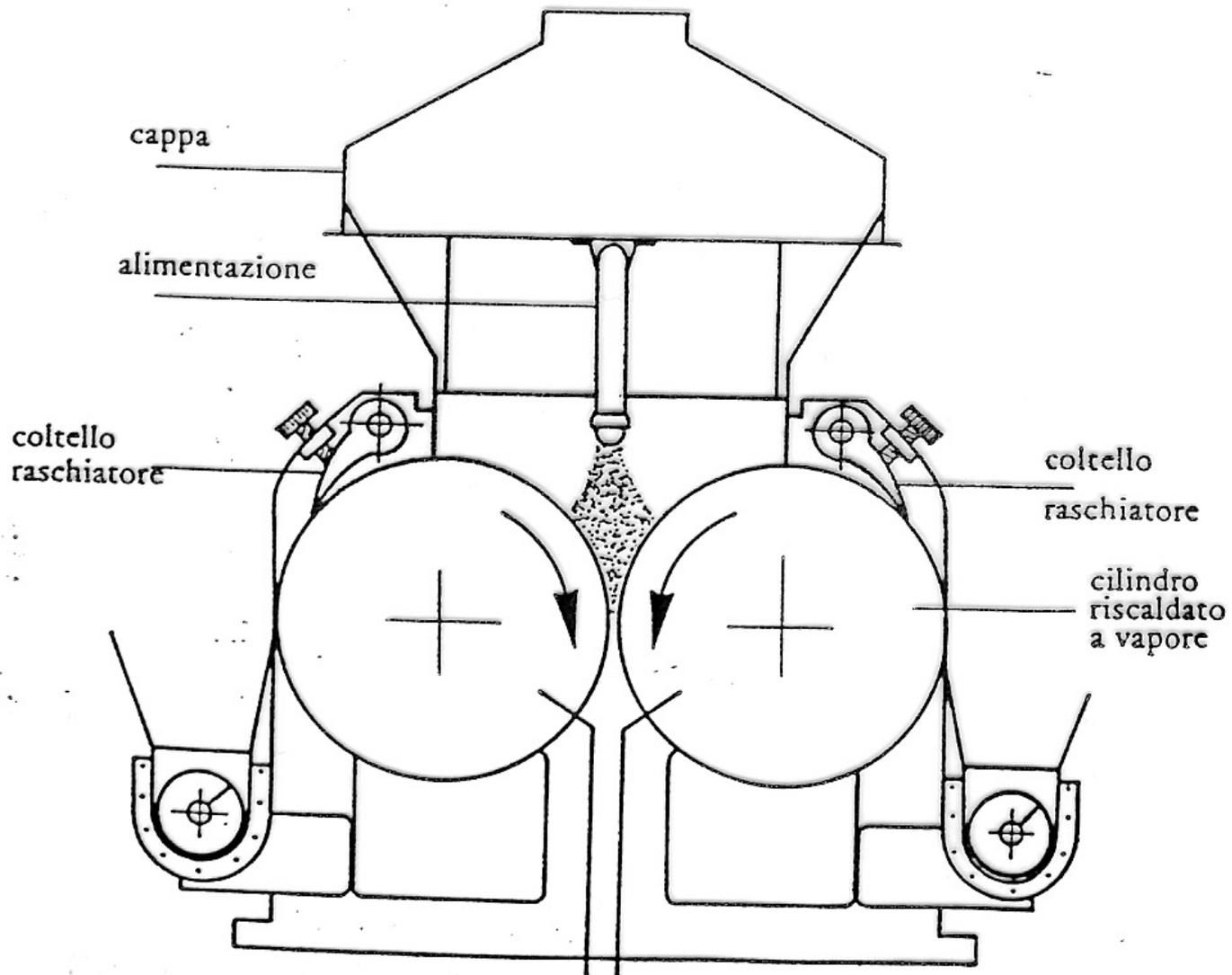
W

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

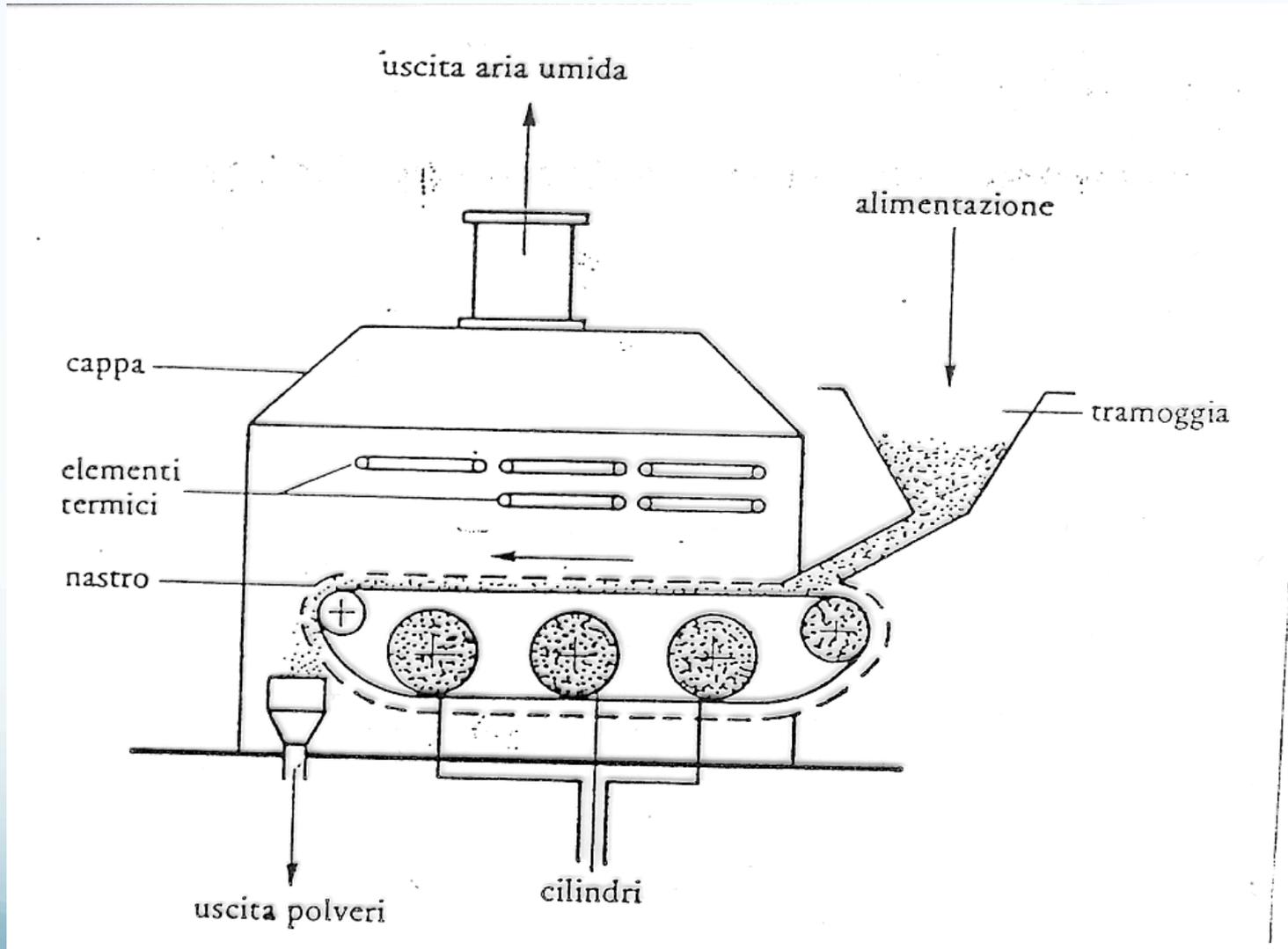
ESSICCATOI A TAMBURO ROTANTE



ESSICCATOI A CILINDRI



ESSICCATOI A NASTRI



ESSICCATOI PER MATERIALI SOSPESI IN UN FLUIDO

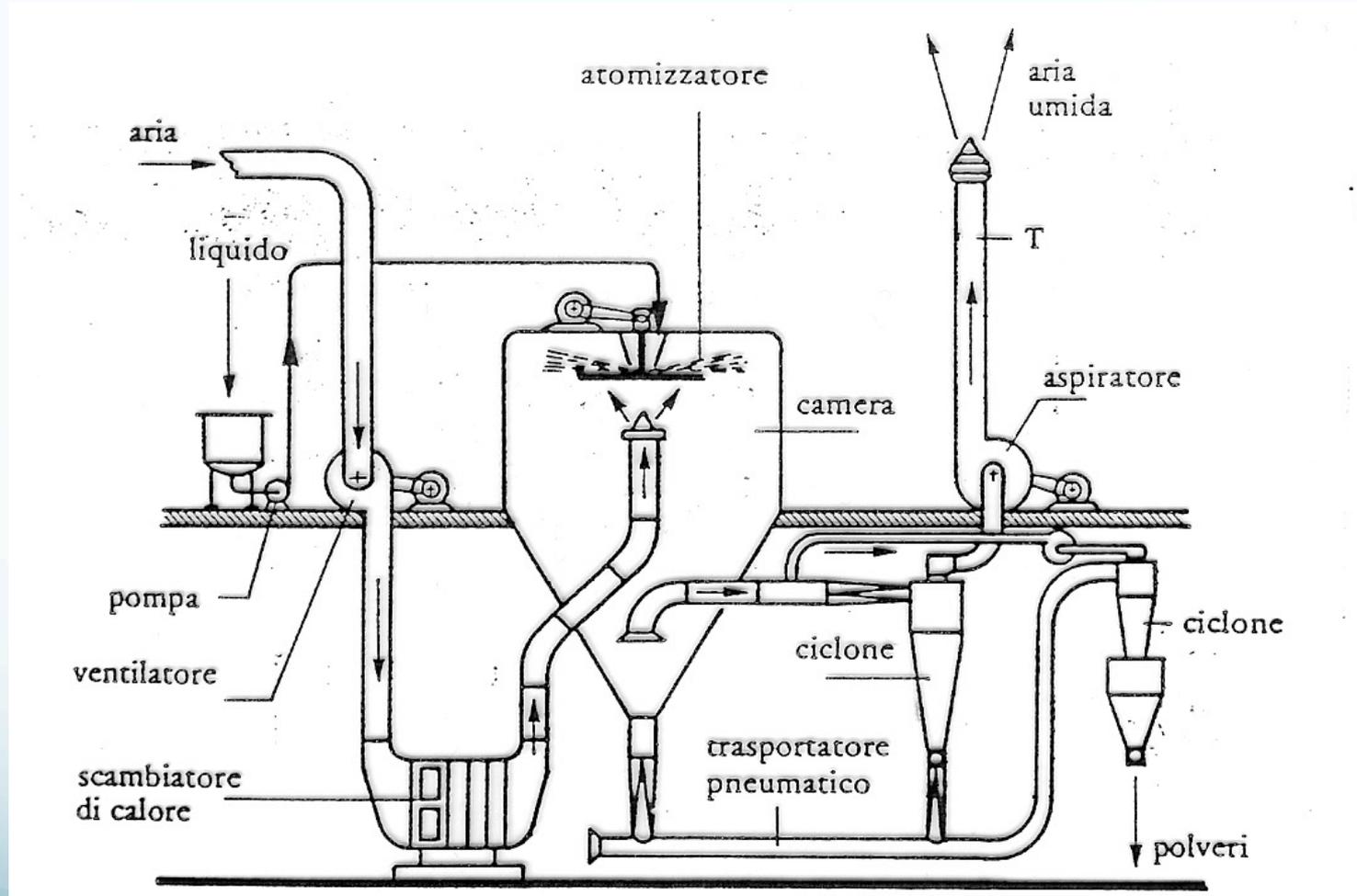
In questi apparecchi il materiale, *gocce o granuli*, viene essiccato per contatto con una corrente di fluido riscaldato (es. aria calda).



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.



Da: LERICI C.R. e LERCKER G. : Principi di tecnologie Alimentari, CLUEB, 1983

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 le 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



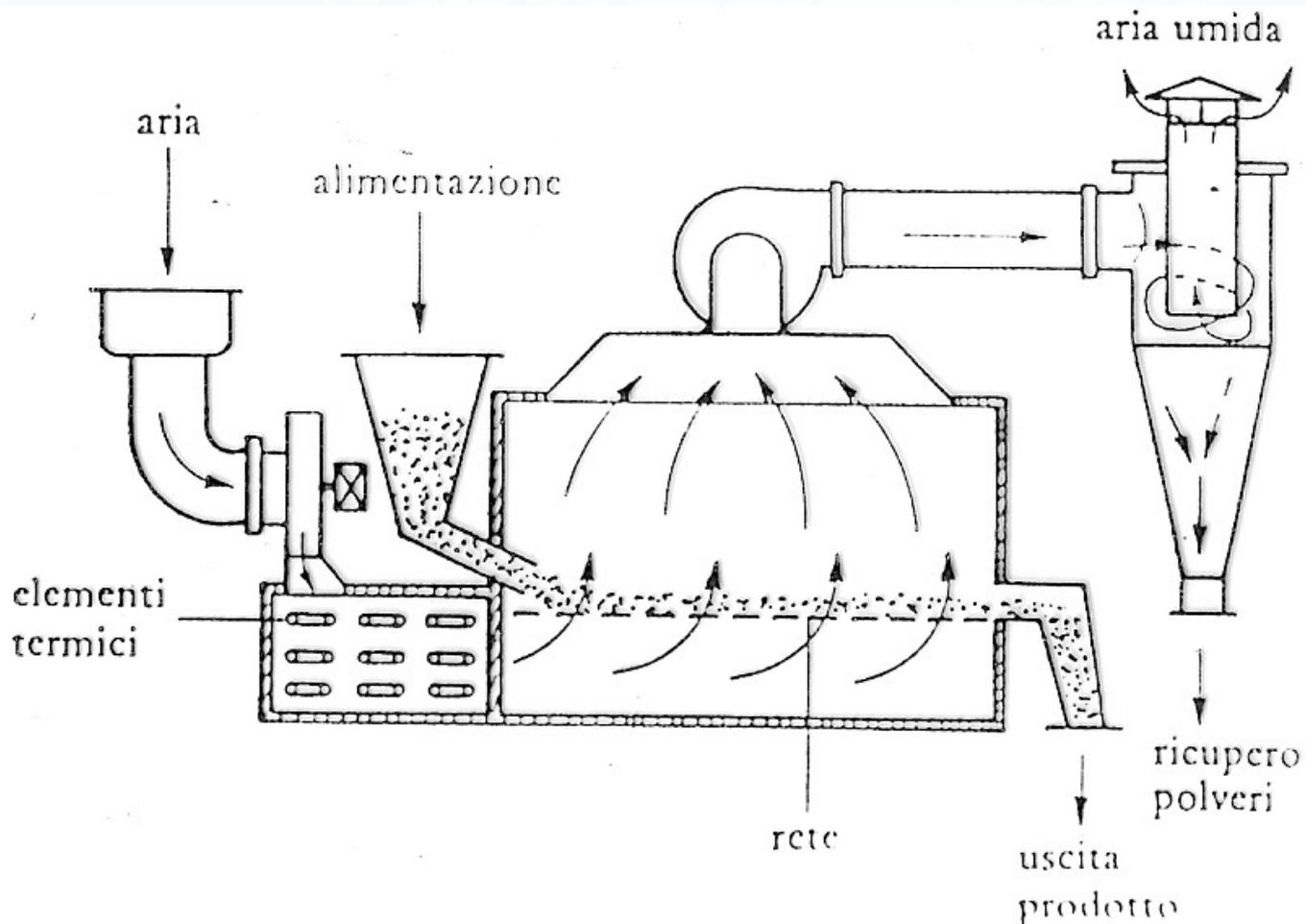
agglomerazione secondaria



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



Da: LERICI C.R. e LERCKER G. : Principi di tecnologie Alimentari, CLUEB, 1983