

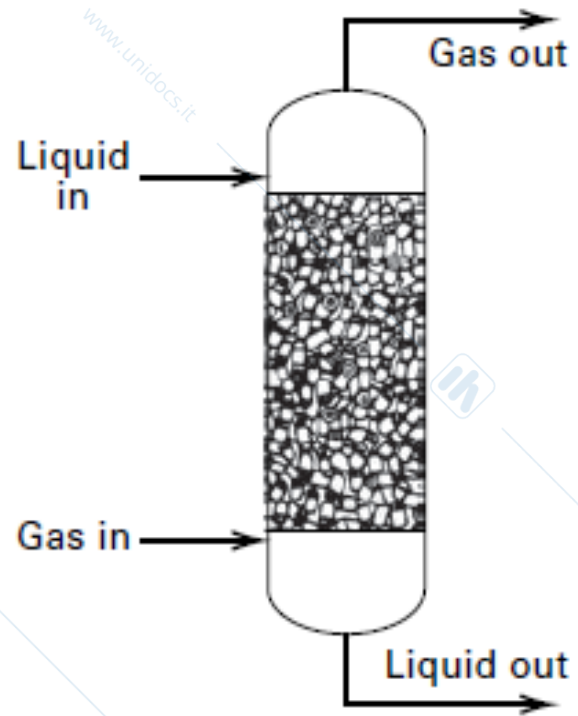


# TECNOLOGIE SOSTENIBILI PER LE RISORSE ENERGETICHE

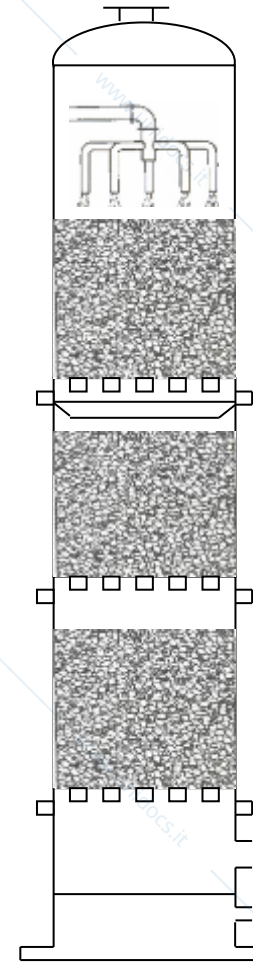
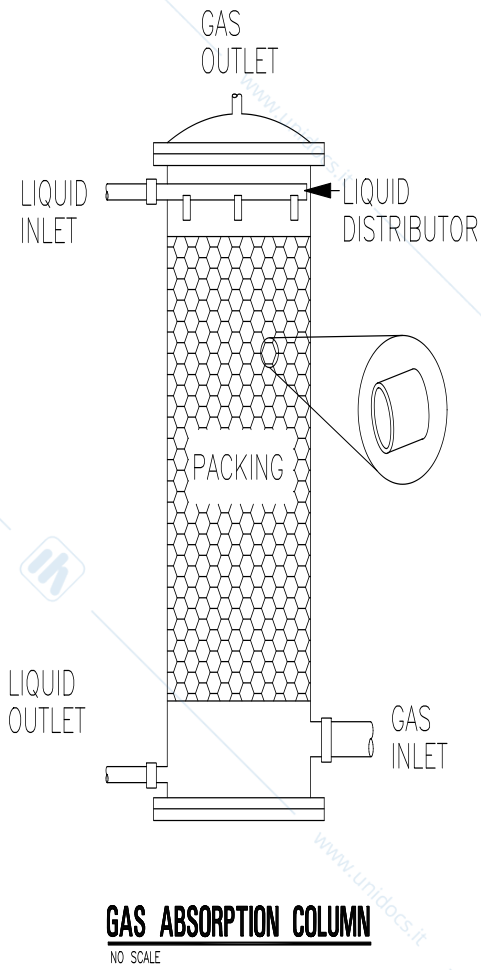
## SEPARAZIONE PER ASSORBIMENTO CON COLONNE A RIEMPIMENTO

**PROF. ERNESTO SALZANO**  
**[ernesto.salzano@unibo.it](mailto:ernesto.salzano@unibo.it)**

# Separazione per Assorbimento: Colonne a riempimento



Colonna impaccata  
Packed column



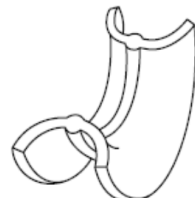
Colonna impaccata  
Packed column



Ceramic Raschig rings



Ceramic Berl saddle



Ceramic Intalox® saddle



Plastic super Intalox® saddle



Metal Intalox® IMTP



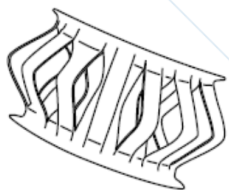
Metal Pall® ring



Plastic Flexiring®



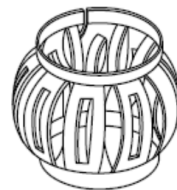
Metal Bialecki® ring



Metal Fleximax®



Metal Cascade Mini-ring® (CMR)



Metal Top-Pak®



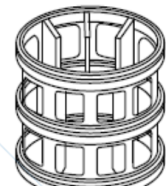
Metal Raschig Super-ring



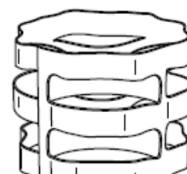
Plastic Tellerette®



Plastic Hackett®



Plastic Hiflow® ring

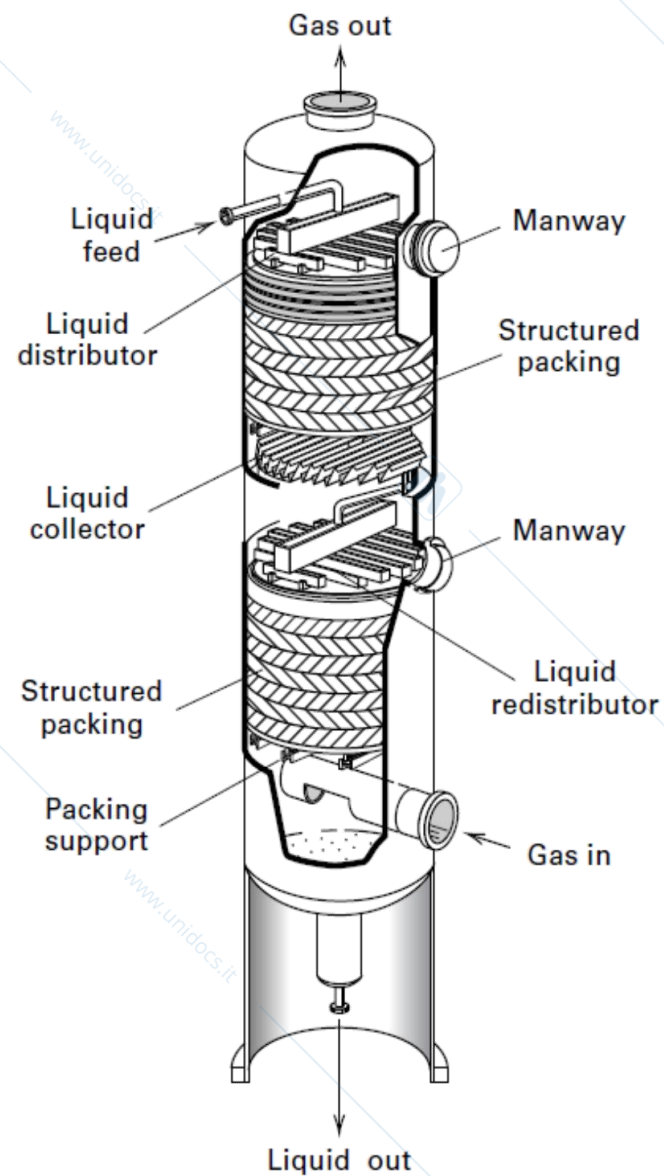


Metal VSP® ring

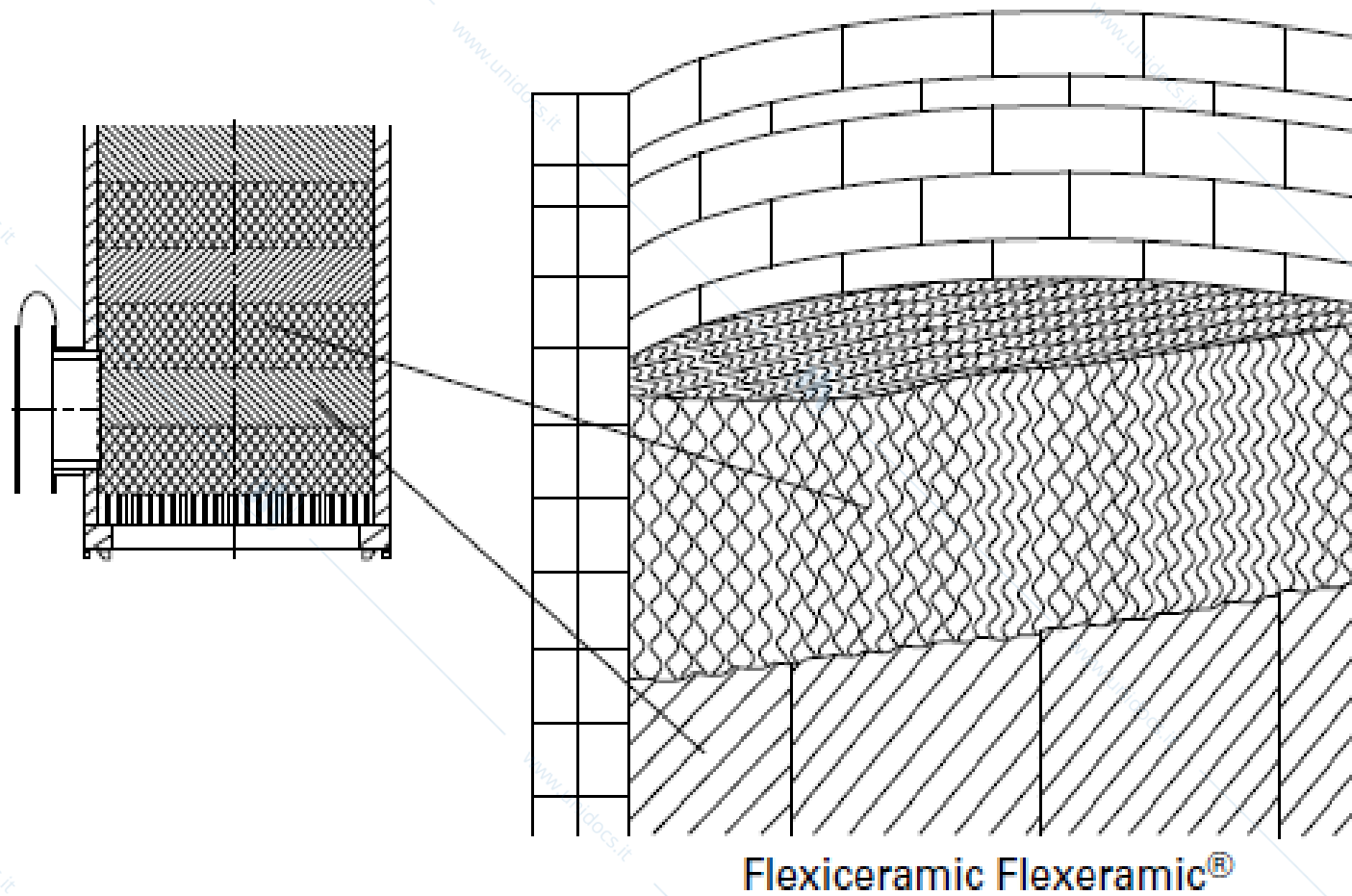
Riempimenti tipici: anelli di riempimento random



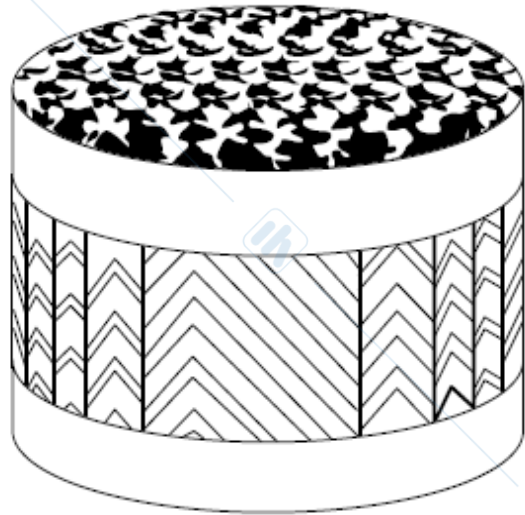
- Anelli in metallo sono preferiti (bagnabilità, resistenza) ma hanno alto costo.
- Anelli in ceramica hanno alto costo ma sono da preferirsi in ambiente corrosivo, alte temperature
- Anelli in plastica (polipropilene) sono economici ma hanno poca «bagnabilità» ossia minore efficienza a basse portate di liquido.



Colonne a riempimento con riempimento strutturato

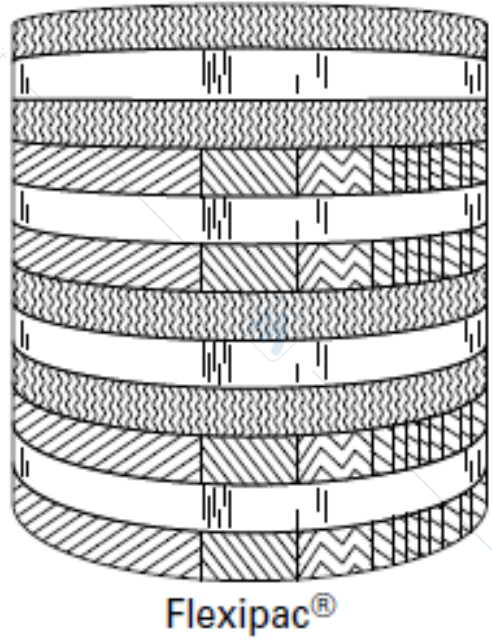


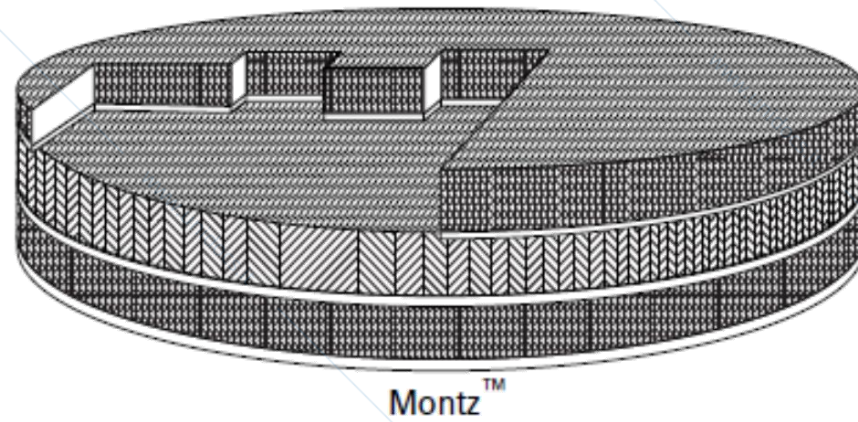
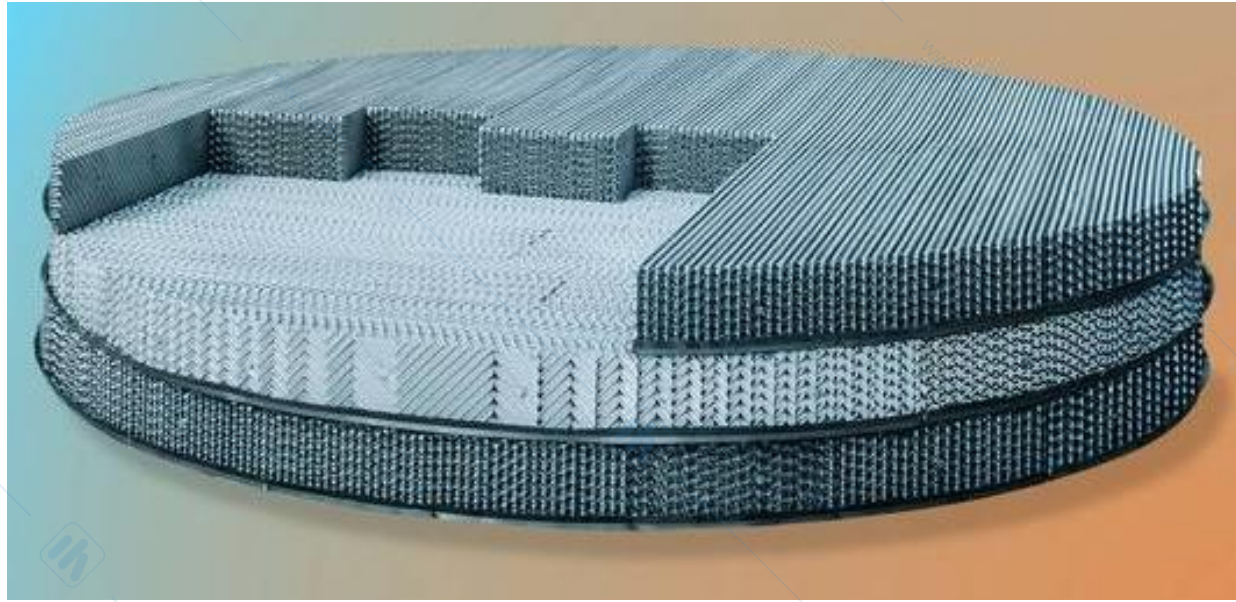
Riempimenti tipici strutturati (< perdite di carico e alta efficienza)



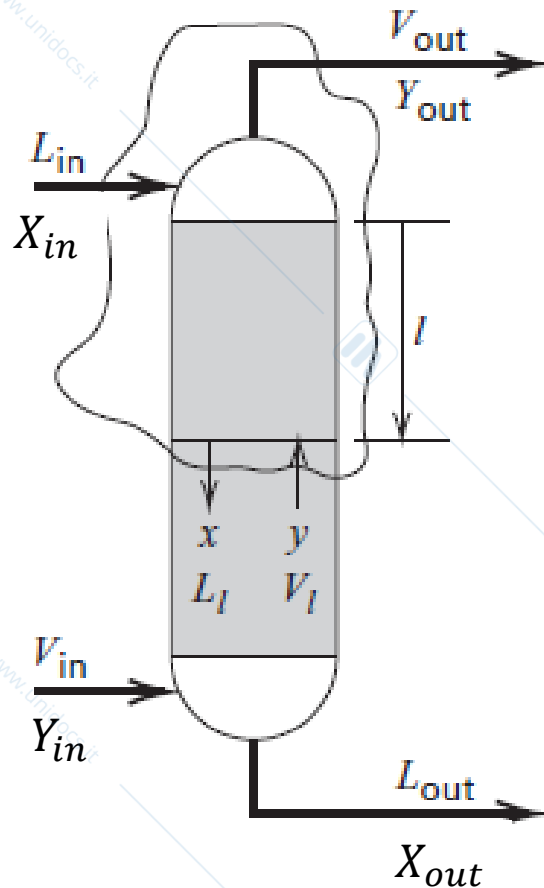
Mellapak™







Come per le colonne a piatti possiamo scrivere il bilancio di materia sulla generica sezione:



Soluto In = Soluto Out

$$LX_{in} + VY = LX + VY_{out}$$

Risolvendo in y si ottiene la retta di lavoro

$$Y = \left( Y_{out} - \frac{L}{V} X_{in} \right) + \frac{L}{V} X$$

Le prestazioni delle Colonne a riempimento sono valutate attraverso UN NUMERO DI STADI EQUIVALENTI DI EQUILIBRIO  $N_T$ :

$$\text{HETP} = \frac{l_T}{N_T}$$

Height Equivalent to a Theoretical Plate

$l_T$  = Altezza del riempimento

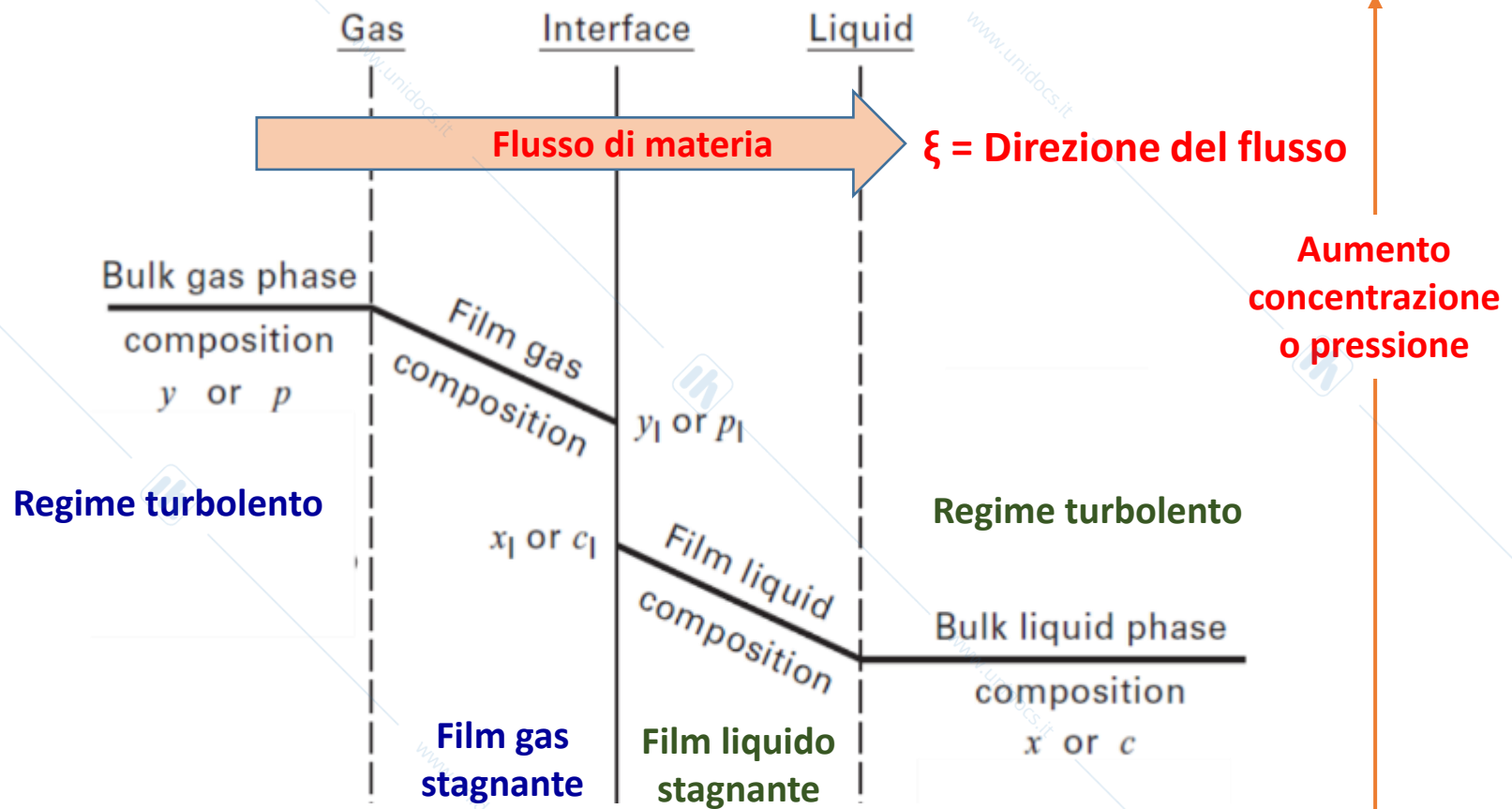
Il calcolo è particolarmente complesso e si ricorre alle basi teoriche del trasporto di materia

I meccanismi di trasferimento di una sostanza attraverso la superficie di contatto fra un gas ed un liquido sono stati rappresentati con diversi modelli.

Fra questi la teoria più consolidata (e più semplice) è **la teoria del doppio film** proposta da **Lewis e Withman** nel 1924.

Si basa sull'ipotesi che all'interfaccia fra gas e liquido si vengano a costituire **due film gas e liquido - in stato di quiete e in condizioni di completo miscelamento** (a pressione e concentrazione uniformi) - **che determinano la resistenza al passaggio delle molecole** fra gas e liquido (o viceversa)

# Separazione per Assorbimento: Colonne a riempimento



## TEORIA DEI DUE FILM: ASSORBIMENTO GAS-LIQUIDO

La **velocità del trasporto di materia attraverso una superficie** è esprimibile attraverso la prima legge di Fick:

$$r = -\mathcal{D}\nabla c$$

$r$  = velocità di trasferimento di massa per unità di superficie [M/ L<sup>2</sup>T]

$\mathcal{D}$  = diffusività molecolare [L<sup>2</sup>/T]

$c$  = concentrazione del costituente [M/ L<sup>3</sup>]

$\nabla$  = gradiente



Adolf Eugene Fick

In termini monodimensionali:

$$r = -\mathcal{D} \frac{dc}{d\xi} = -\mathcal{D}A \frac{dc}{dV}$$

V = Volume

A = Superficie

Per gas poco densi la diffusività varia con l'inverso della pressione e cresce con la potenza (circa) 1.8 della temperatura

*Gas in gas*

$$\mathcal{D} = 0.1-1 \text{ cm}^2/\text{s} \text{ (P= 1 atm)}$$

*Liq. o gas in liquido*

$$\mathcal{D} = 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$$

*Gas in solido*

$$\mathcal{D} = 10^{-6}- 10^{-10} \text{ cm}^2/\text{s}$$

In termini integrali

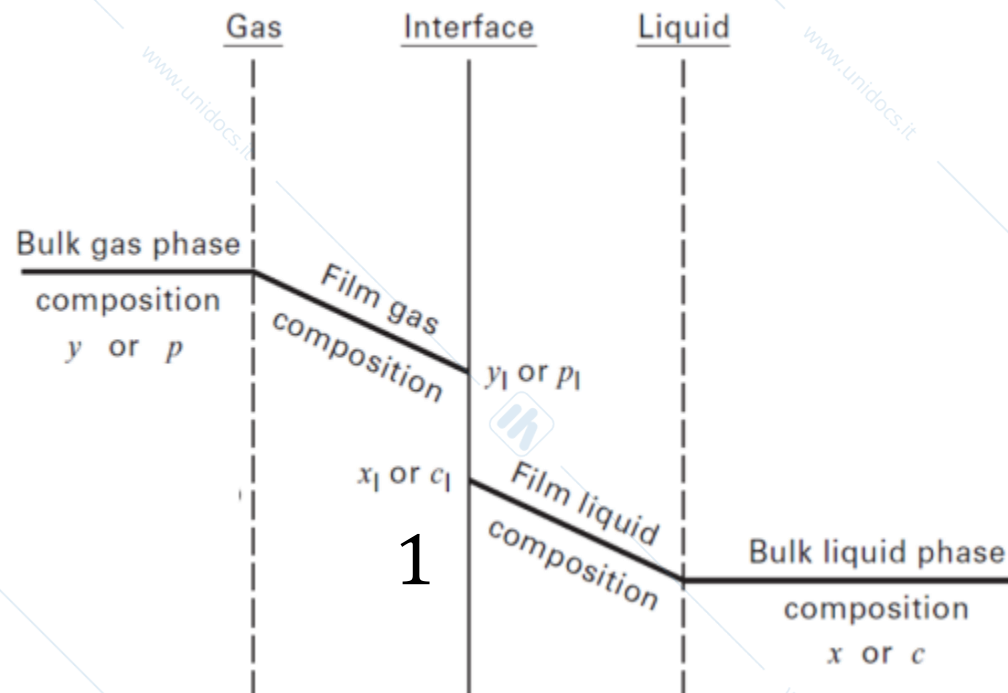
$$r = -\mathcal{D}A \frac{\Delta c}{\Delta V} = -\mathcal{D}a\Delta c$$

a = Superficie per unità di volume [L<sup>-1</sup>]

Utilizzando le frazioni molari si ha:

$$r = -\mathcal{D}a\Delta c = ka\Delta y$$

Il termine k = coefficiente di trasporto di materia [M·L<sup>-1</sup> T<sup>-1</sup>] è di utilizzo ingegneristico e facilita la valutazione tecnica dei flussi di materia

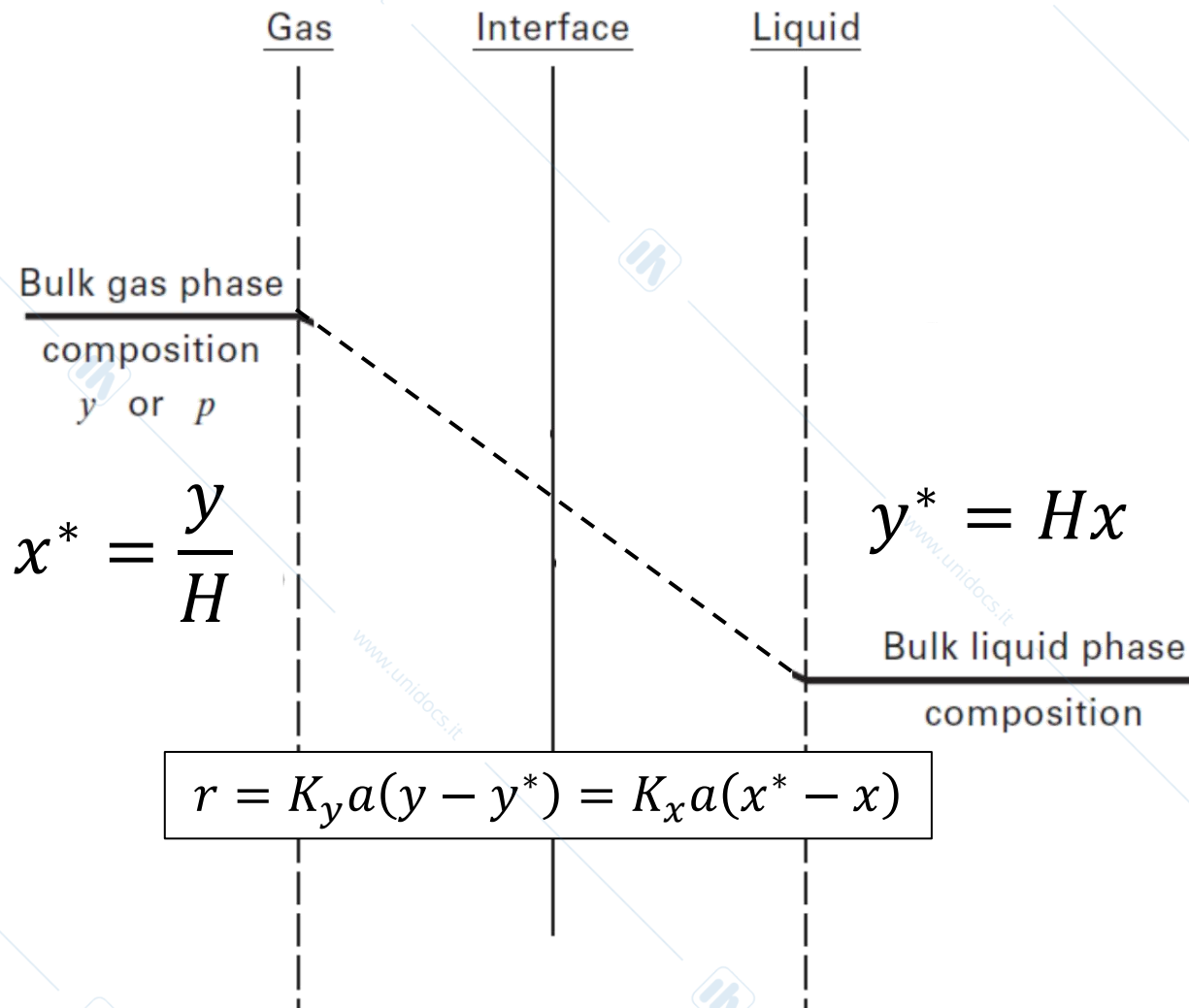


All'equilibrio (stato stazionario):

$$r = k_y a (y - y_1) = k_x a (x_1 - x)$$

# Separazione per Assorbimento: Colonne a riempimento

Le concentrazioni all'interfaccia  $x_1$  e  $y_1$  sono difficili da misurare e si usano composizioni di equilibrio «fittizie» (**le  $k$  diventano «globali» e si usa  $K$** )



Con queste assunzioni si ha:

$$k_y a(y - y_1) = k_x a(x_1 - x) = K_y a(y - y^*) = K_x a(x^* - x)$$

$$\frac{k_y(y - y_1)}{K_y} = (y - y^*) = (y - y_1) + (y_1 - y^*)$$

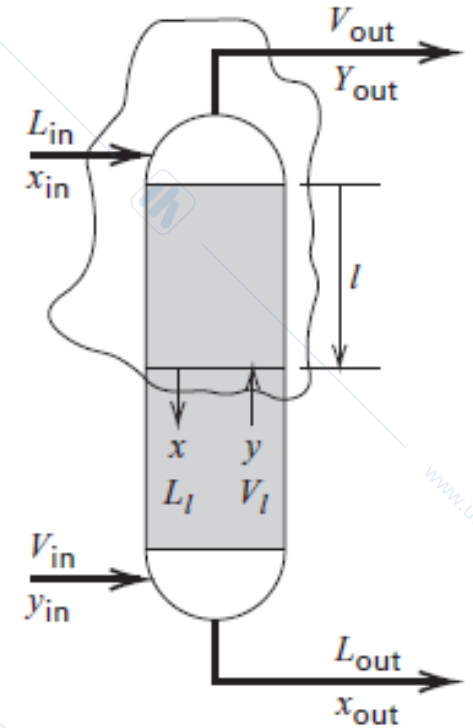
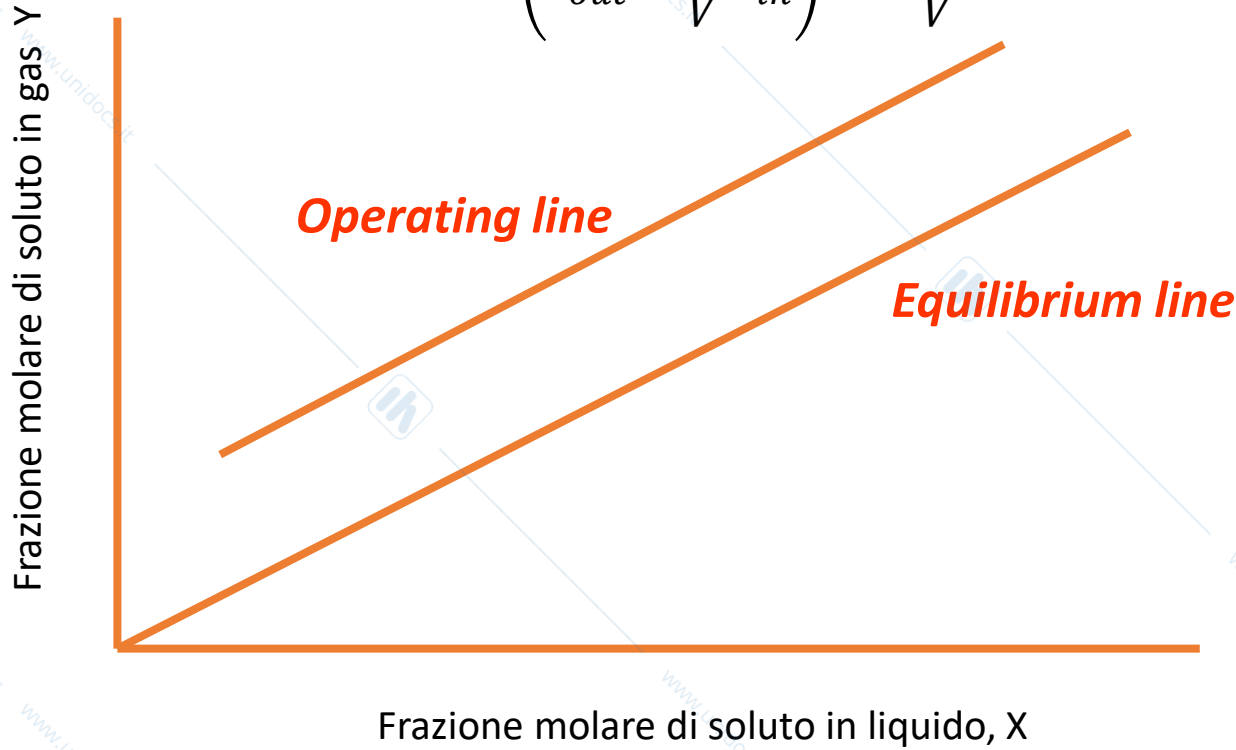
$$\frac{1}{K_y} = \frac{(y - y_1)}{k_y(y - y_1)} + \frac{(y_1 - y^*)}{k_y(y - y_1)}$$

$$\frac{1}{K_y} = \frac{1}{k_y} + \frac{(y_1 - y^*)}{k_x(x_1 - x)}$$

In genere, la resistenza al trasporto di massa è concentrata nella fase gassosa. Si trascura pertanto l'analisi lato liquido.

# Separazione per Assorbimento: Colonne a riempimento

$$Y = \left( Y_{out} - \frac{L}{V} X_{in} \right) + \frac{L}{V} X$$



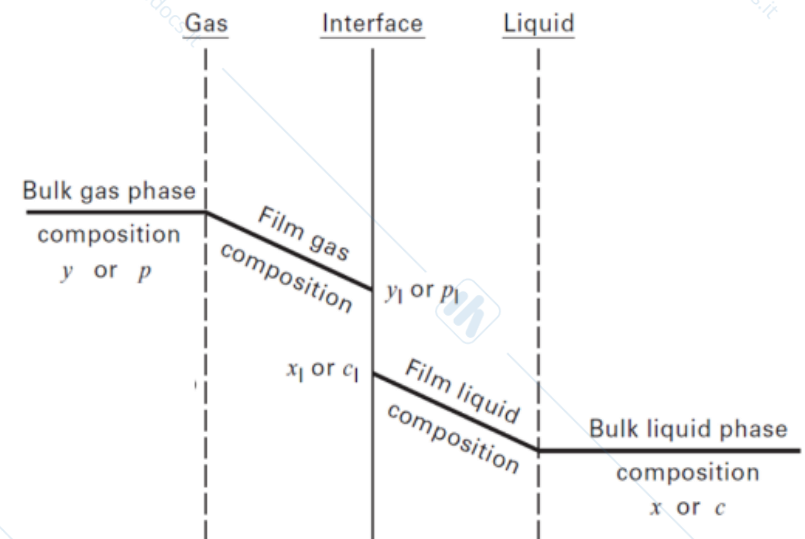


Consideriamo un generic punto A lungo la colonna, con concentrazioni x,y

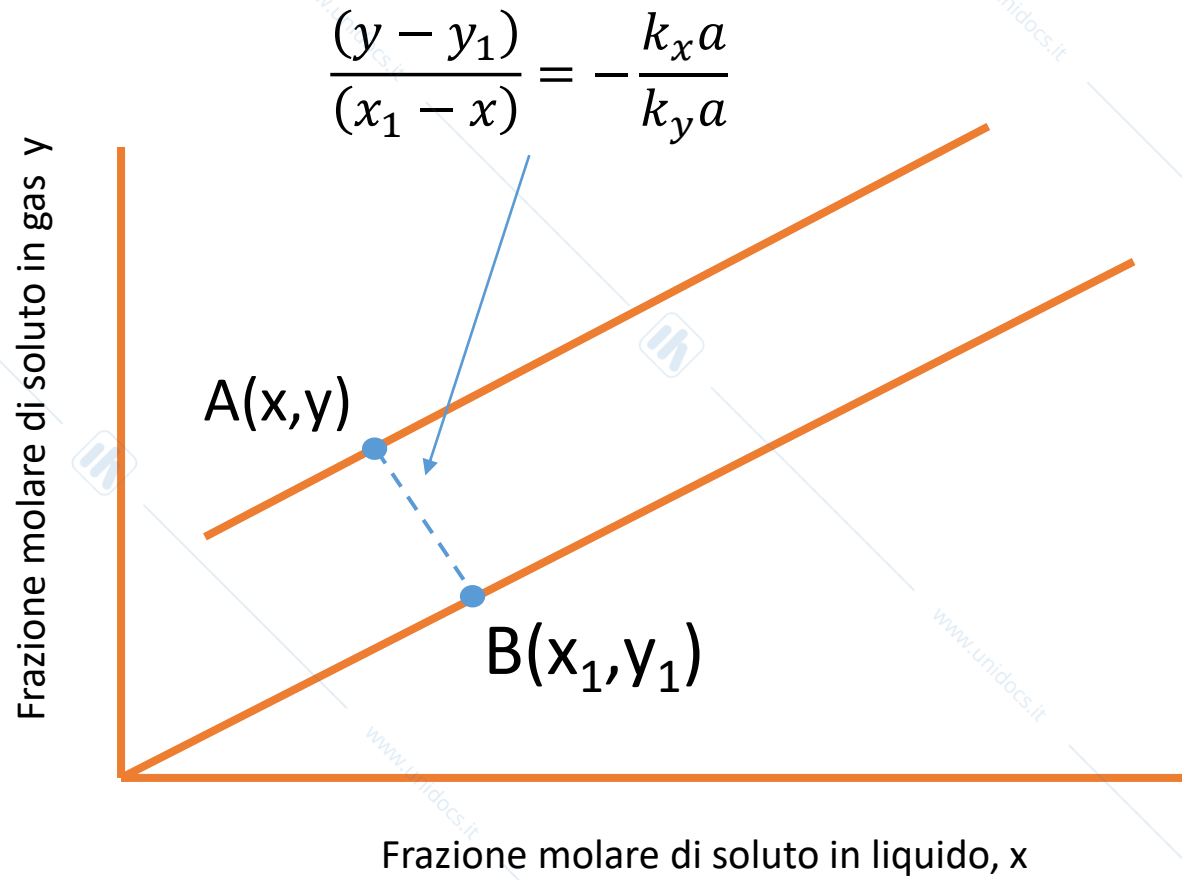
$$r = k_y a(y - y_1) = k_x a(x_1 - x)$$

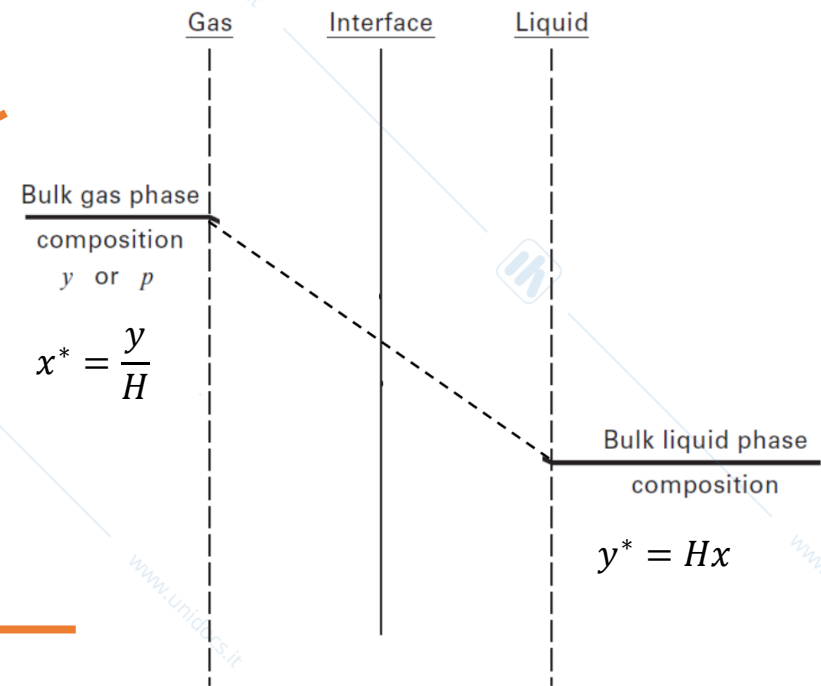
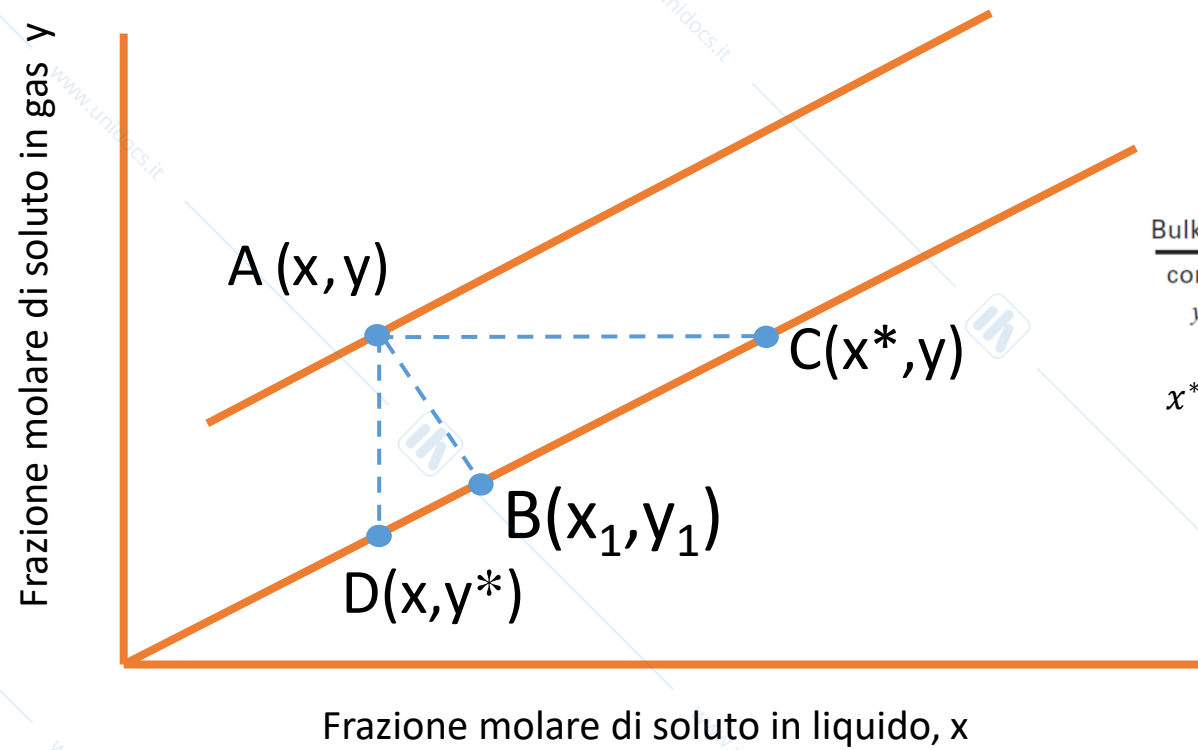
$$(y - y_1) = \frac{k_x a(x_1 - x)}{k_y a}$$

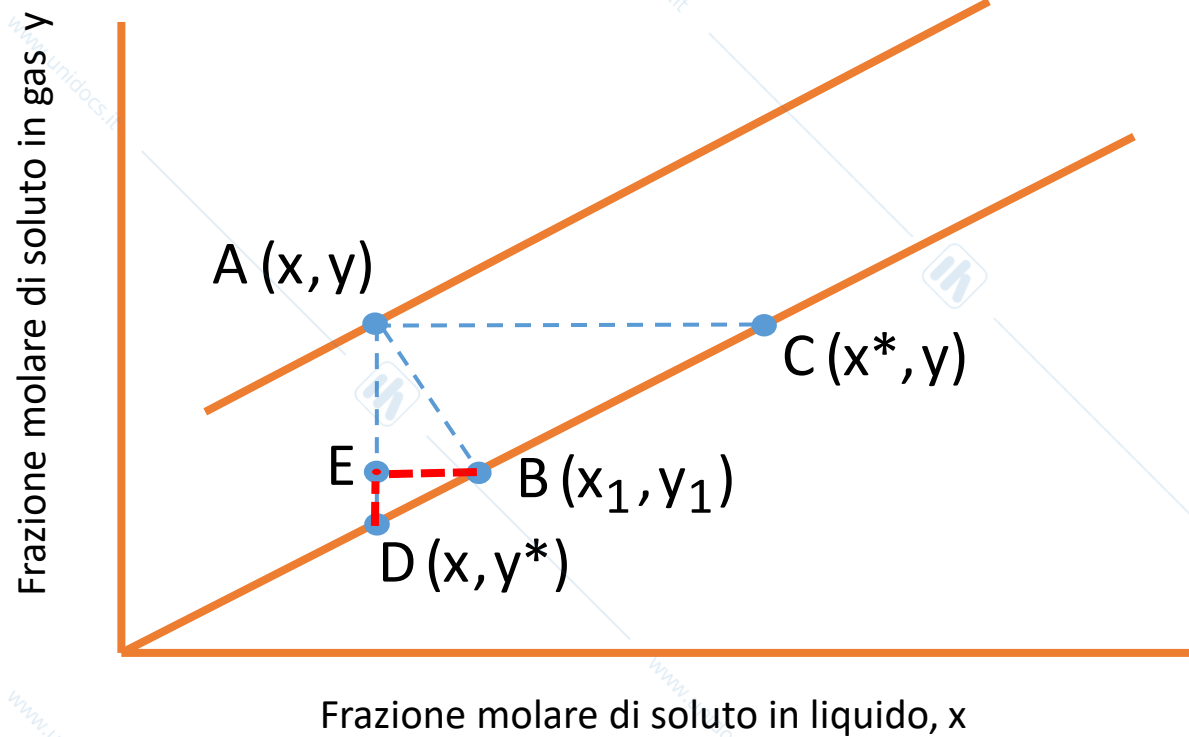
$$\frac{(y - y_1)}{(x_1 - x)} = -\frac{k_x a}{k_y a}$$



Equazione del segmento tra un punto  $x, y$  e un punto (interfaccia)  $x_1, y_1$







$$y_1 - y^* = \overline{ED}$$

$$x_1 - x = \overline{BE}$$

$$\frac{(y_1 - y^*)}{(x_1 - x)} = \frac{\overline{ED}}{\overline{BE}} = K$$

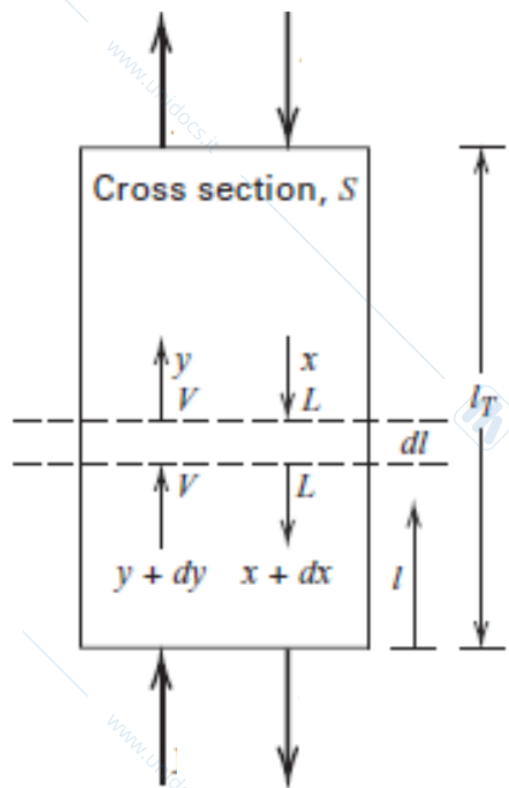
$$\frac{1}{K_y} = \frac{1}{k_y} + \frac{(y_1 - y^*)}{k_x(x_1 - x)}$$

$$\frac{(y_1 - y^*)}{(x_1 - x)} = K$$

$$\frac{1}{K_y} = \frac{1}{k_y} + \frac{K}{k_x}$$

Equazione di partenza per lo studio delle colonne impaccate, lato gas ( $K_y$ ).

## Calcolo dell'altezza del riempimento



La variazione del numero di moli  $dn$  scambiate per unità di tempo nell'elemento di volume  $dv = A dl$  dove  $A$  è la superficie della torre è pari a:

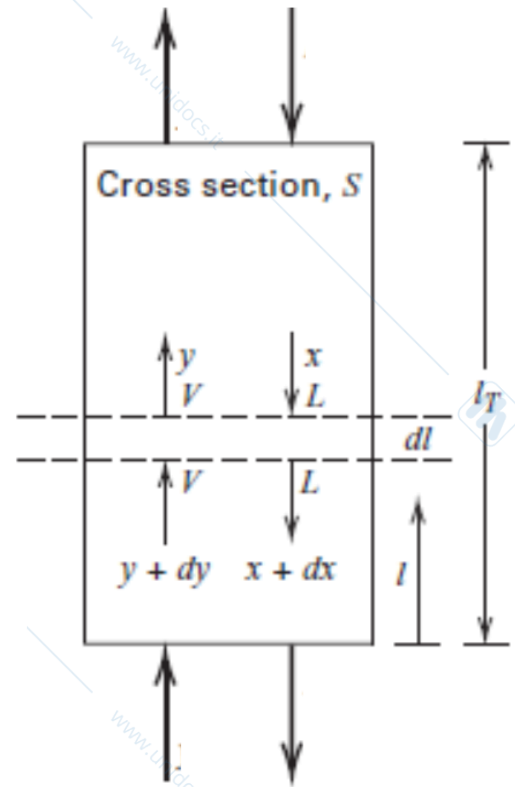
$$\left(\frac{dn}{dt}\right)_{dv} = -V dy$$

Vale anche, con superficie  $A$  costante (ricordando che  $a$  è una superficie per unità di volume):

$$\left(\frac{dn}{dt}\right)_{dv} = rA = K_y a (y - y^*) A dl$$

da cui:

$$-V dy = K_y a (y - y^*) A dl$$



$$-Vdy = K_y a (y - y^*) A dl$$

$$\frac{dy}{(y^* - y)} = \frac{K_y a A}{V} dl$$

$$\int_{y_{in}}^{y_{out}} \frac{dy}{(y^* - y)} = \frac{K_y a A}{V} \int_0^{l_T} dl$$

$$l_T = \frac{V}{K_y a A} \int_{y_{in}}^{y_{out}} \frac{dy}{(y^* - y)}$$

Si possono osservare due termini:

$$l_T = \frac{V}{K_y a A} \cdot \int_{y_{in}}^{y_{out}} \frac{dy}{(y^* - y)}$$

$$H_{OG} = \frac{V}{K_y a A}$$

$H_{OG}$  = Altezza di un'unità di trasporto globale in fase gassosa

$$N_{OG} = \int_{y_{in}}^{y_{out}} \frac{dy}{(y^* - y)}$$

$N_{OG}$  = Numero di unità di trasporto globali in fase gassosa

$$y = \left( y_{out} - \frac{L}{V} x_{in} \right) + \frac{L}{V} x$$

$$x = \frac{V}{L} y - \frac{V}{L} y_{out} + x_{in}$$

$$y^* = Kx = K \left( \frac{V}{L} y - \frac{V}{L} y_{out} + x_{in} \right)$$

$$N_{OG} = \int_{y_{in}}^{y_{out}} \frac{dy}{(y^* - y)} = \int_{y_{in}}^{y_{out}} \frac{dy}{K \left( \frac{V}{L} y - \frac{V}{L} y_{out} + x_{in} \right) - y}$$

$$N_{OG} = \int_{y_{in}}^{y_{out}} \frac{dy}{\frac{KV}{L}y - y - \frac{KV}{L}y_{out} + Kx_{in}}$$

$$A = \frac{L}{KV}$$

$$N_{OG} = \int_{y_{in}}^{y_{out}} \frac{dy}{\frac{1}{A}y - y - \frac{1}{A}y_{out} + Kx_{in}} = \int_{y_{in}}^{y_{out}} \frac{dy}{y\left(\frac{1}{A} - 1\right) - \frac{1}{A}y_{out} + Kx_{in}}$$

$$\lambda = \frac{A - 1}{A}$$

$$N_{OG} = \int_{y_{in}}^{y_{out}} \frac{dy}{y\left(\frac{A - 1}{A}\right) - \frac{1}{A}y_{out} + Kx_{in}} = \int_{y_{in}}^{y_{out}} \frac{dy}{\lambda y - \frac{1}{A}y_{out} + Kx_{in}}$$

$$N_{OG} = \ln \left[ \frac{\lambda(y_{in} - Kx_{in})}{y_{out} - Kx_{in}} + \frac{\lambda}{A} \right]$$

$$N_{OG} = \ln \left[ \frac{\lambda(y_{in} - Kx_{in})}{y_{out} - Kx_{in}} + \frac{\lambda}{A} \right]$$

Equazione analoga all'equazione di Kremser

Altre espressioni di HTU e NTU

Driving Force	Symbol	Height of a Transfer Unit, HTU	Number of a Transfer Unit, NTU
1. $(y - y^*)$	$H_{OG}$	$\frac{V}{K_y a S}$	$N_{OG} \int \frac{dy}{(y - y^*)}$
2. $(p - p^*)$	$H_{OG}$	$\frac{V}{K_G a P S}$	$N_{OG} \int \frac{dp}{(p - p^*)}$
3. $(Y - Y^*)$	$H_{OG}$	$\frac{V'}{K_Y a S}$	$N_{OG} \int \frac{dY}{(Y - Y^*)}$
4. $(y - y_1)$	$H_G$	$\frac{V}{k_Y a S}$	$N_G \int \frac{dy}{(y - y_1)}$
5. $(p - p_1)$	$H_G$	$\frac{V}{k_p a P S}$	$N_G \int \frac{dp}{(p - p_1)}$
6. $(x^* - x)$	$H_{OL}$	$\frac{L}{K_x a S}$	$N_{OL} \int \frac{dx}{(x^* - x)}$
7. $(c^* - c)$	$H_{OL}$	$\frac{L}{K_L a (\rho_L / M_L) S}$	$N_{OL} \int \frac{dc}{(c^* - c)}$

Nella trattazione, la curva operativa e la curva di equilibrio sono rette e parallele. In questo caso:

$$N_T = N_{OG}$$
$$HETP = H_{OG}$$

Per rette non parallele

$$N_T = N_{OG} \left( \frac{A}{A-1} \right) \ln A$$

$$HETP = H_{OG} \left( \frac{A}{A-1} \right) \ln A$$

Per HETP si usano correlazioni predefinite dai fornitori di riempimenti

## High-efficiency random packing

$$HETP [ft] = 1.5 \cdot D_P [in]$$

## Structured packing

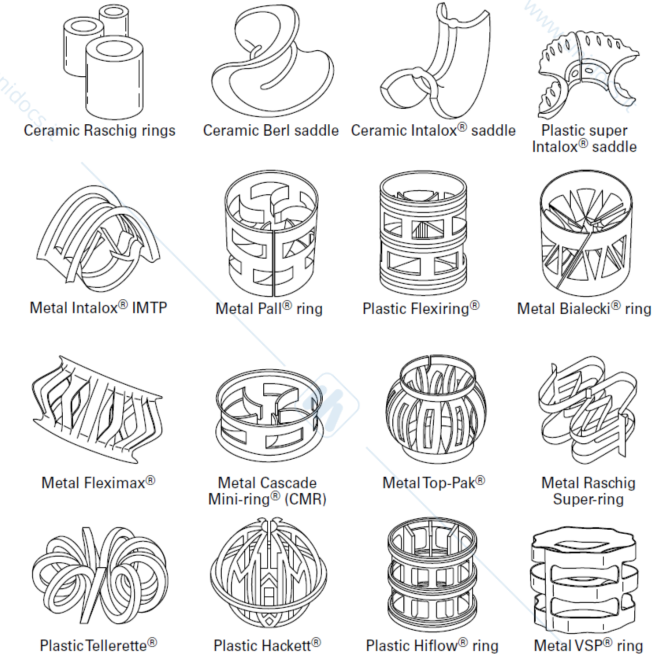
$$HETP = 6 ft$$

## Assorbimento con liquidi viscosi

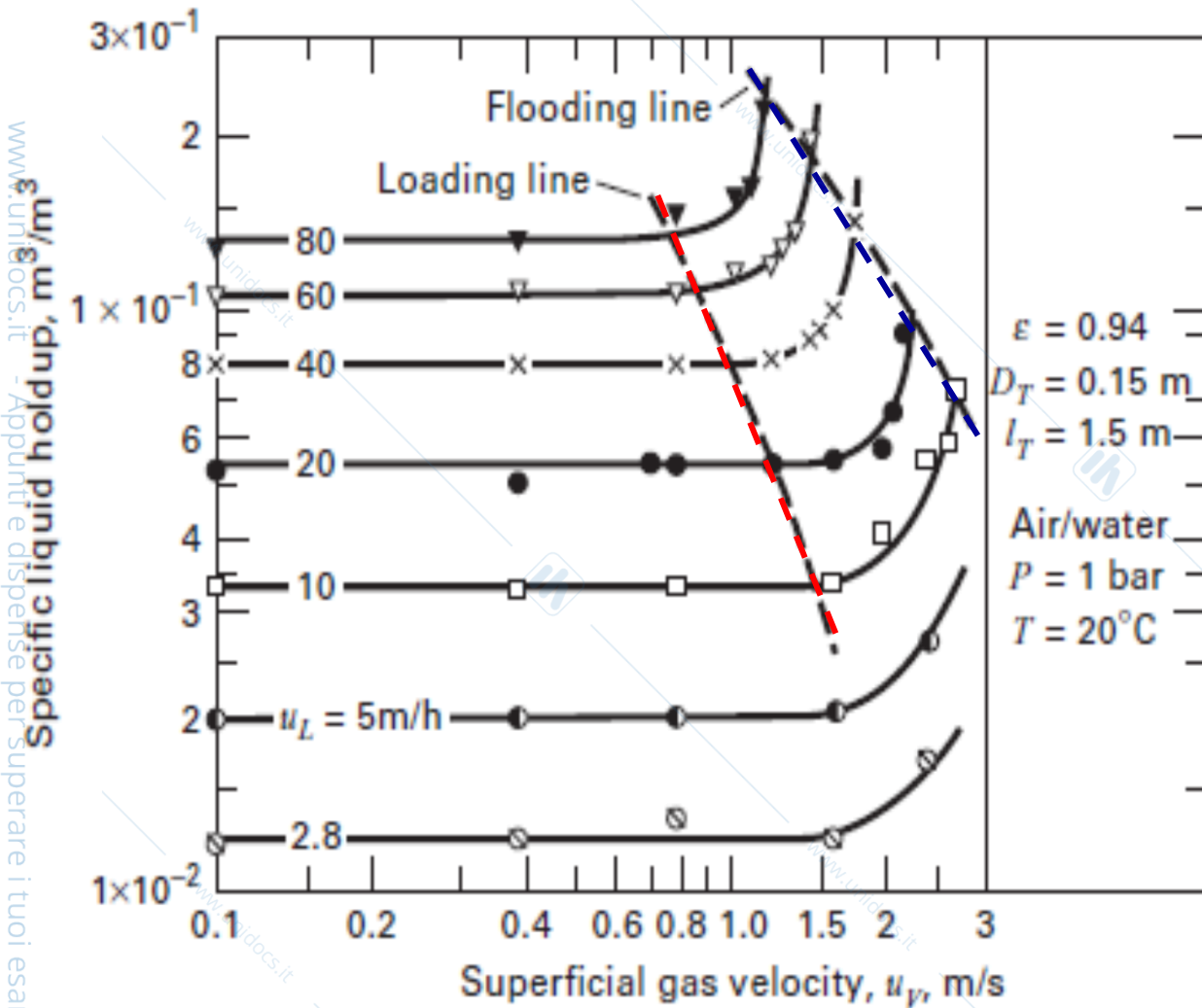
$$HETP = 1.5 \cdot D_P [in] + 0.5$$

## Colonne di piccola dimensione $D_T \leq 2 ft (< 0.7 m)$ (ma $HETP > 1 ft$ )

$$HETP [ft] = 1.5 \cdot D_T [ft]$$



# Separazione per Assorbimento: Colonne a riempimento



Hold-up =  $m^3$  liquido/  $m^3$  letto riempito

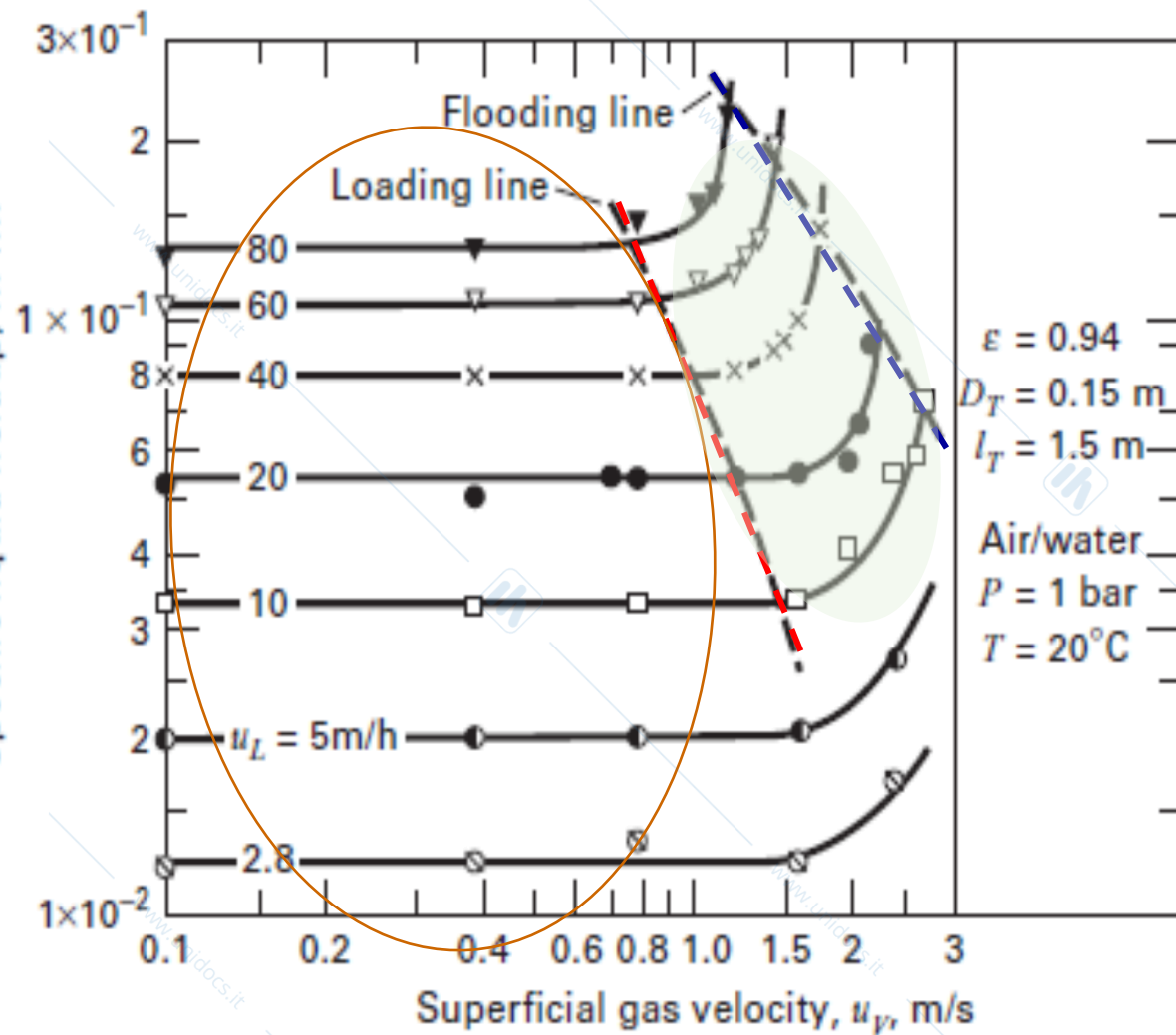
**Linea di carico (loading):** luogo dei punti con velocità massima del gas per avere un hold-up costante.

**Linea di allagamento (flooding):** la colonna è piena di liquido e il  $\Delta P$  cresce indefinitamente (incompressibilità)

Air/water  
 $P = 1 \text{ bar}$   
 $T = 20^\circ\text{C}$   
 $\epsilon = 0.94$   
 $D_T = 0.15 \text{ m}$   
 $l_T = 1.5 \text{ m}$

# Separazione per Assorbimento: Colonne a riempimento

www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari



Hold-up =  $m^3$  liquido /  $m^3$  letto riempito

**Loading region:** l'holdup cresce rapidamente, la mass-transfer efficiency diminuisce all'aumentare della velocità del gas. Le operazioni sono instabili

**Pre-loading:** regione operativa, si opera con velocità pari al 70 % del flooding point

Air/water  $\epsilon = 0.94$   
 $P = 1$  bar  $D_T = 0.15$  m  
 $T = 20^\circ\text{C}$   $l_T = 1.5$  m

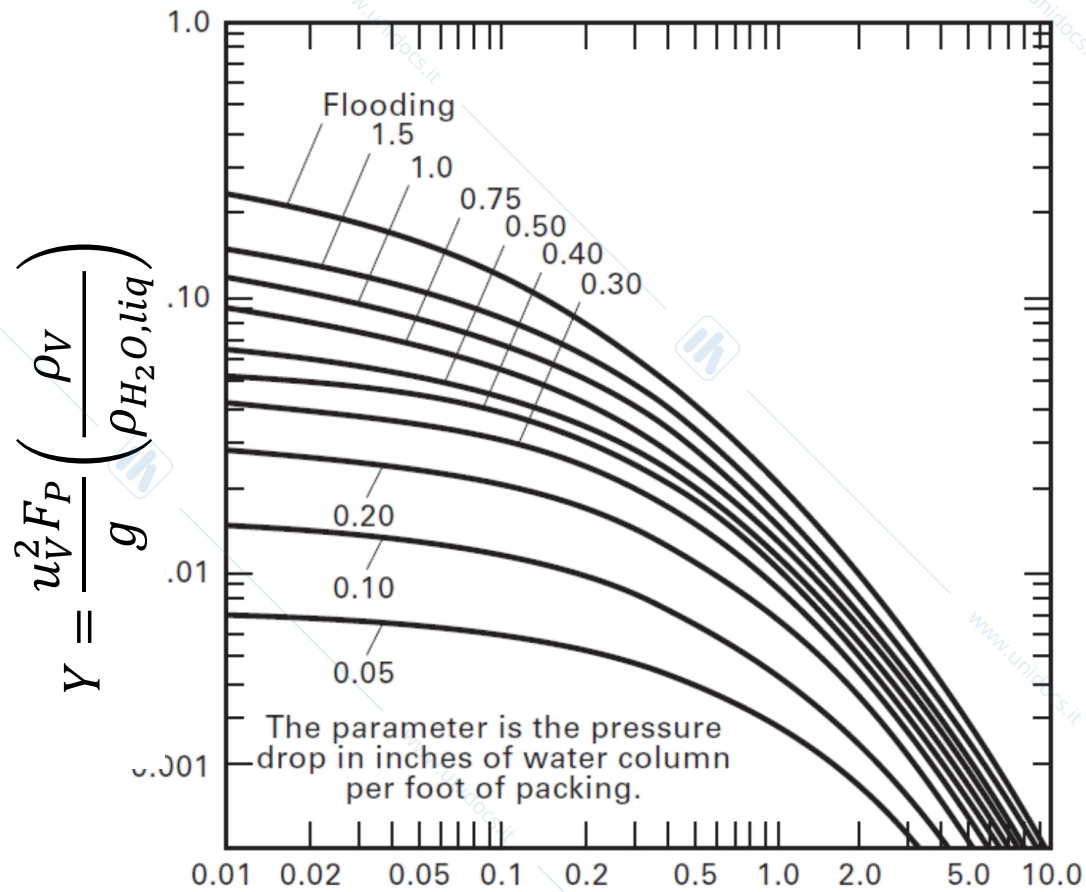
www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari

A bassissime velocità del liquido, l'hold-up può essere così piccolo che non vi è completa bagnabilità: l'efficienza di scambio cala moltissimo.

Per ovviare occorre disporre distributori di liquido

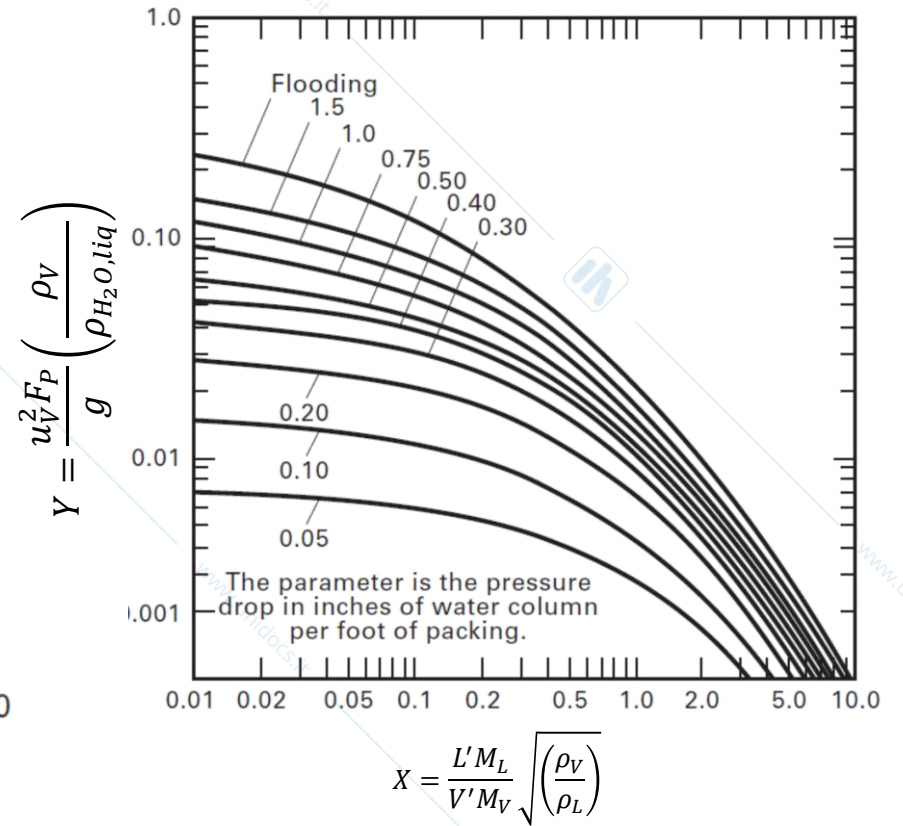
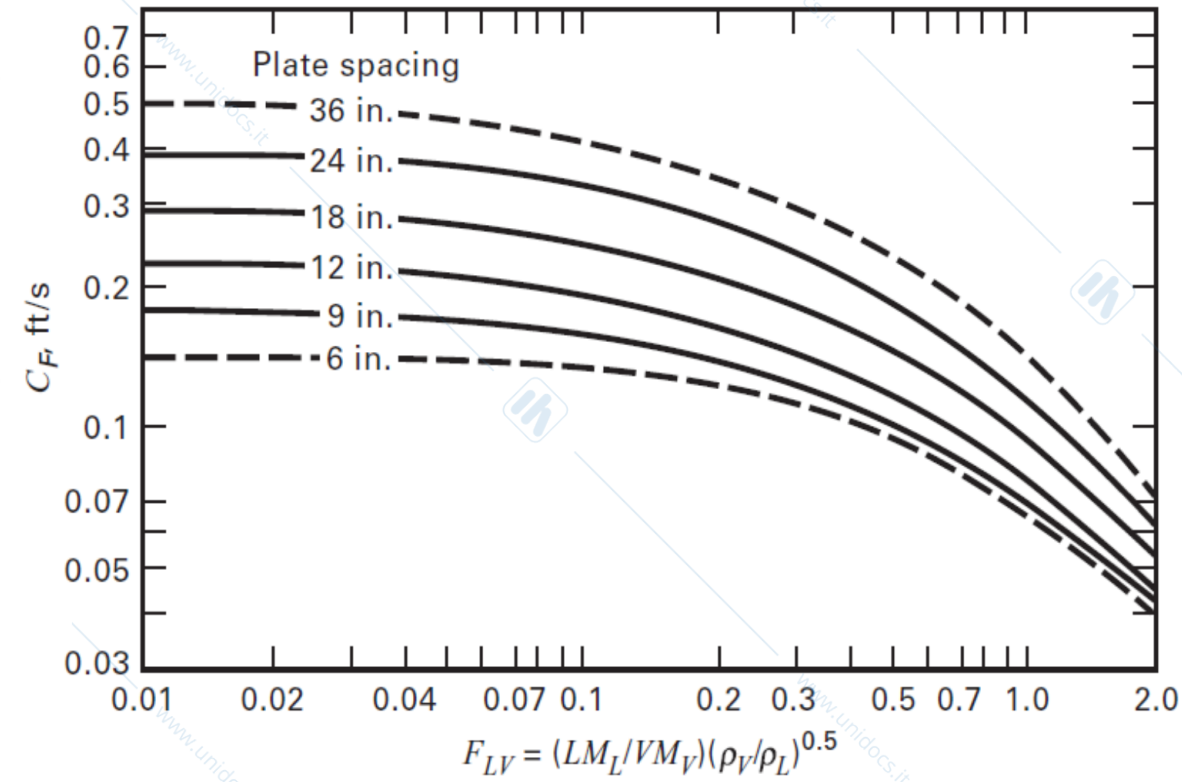
Il diametro  $D_T$  e le altre variabili di progettazione si calcolano in modo da operare nella regione di preloading

Il CALCOLO del DIAMETRO procede come da figura seguente  
(diagramma **Generalised Pressure Drop Correlation** o GPDC)



$$X = \frac{L' M_L}{V' M_V} \sqrt{\left(\frac{\rho_V}{\rho_L}\right)}$$

# Separazione per Assorbimento: Colonne a riempimento



$$F_{LV} = X$$

# Separazione per Assorbimento: Colonne a riempimento

1. Da X andando sulla prima curva in alto (flooding) si ottiene Y e quindi la velocità di flooding  $u_{v,f}$
2. Si calcola la  $u_v$  del gas in colonna come il 60% (fattore di flooding f) della velocità di flooding  $u_{v,f}$ :  $f_{v,f}$

$$u_v = f_{v,f} \sqrt{Y \frac{g}{F_p} \left( \frac{\rho_{H_2O,liq}}{\rho_v} \right)}$$

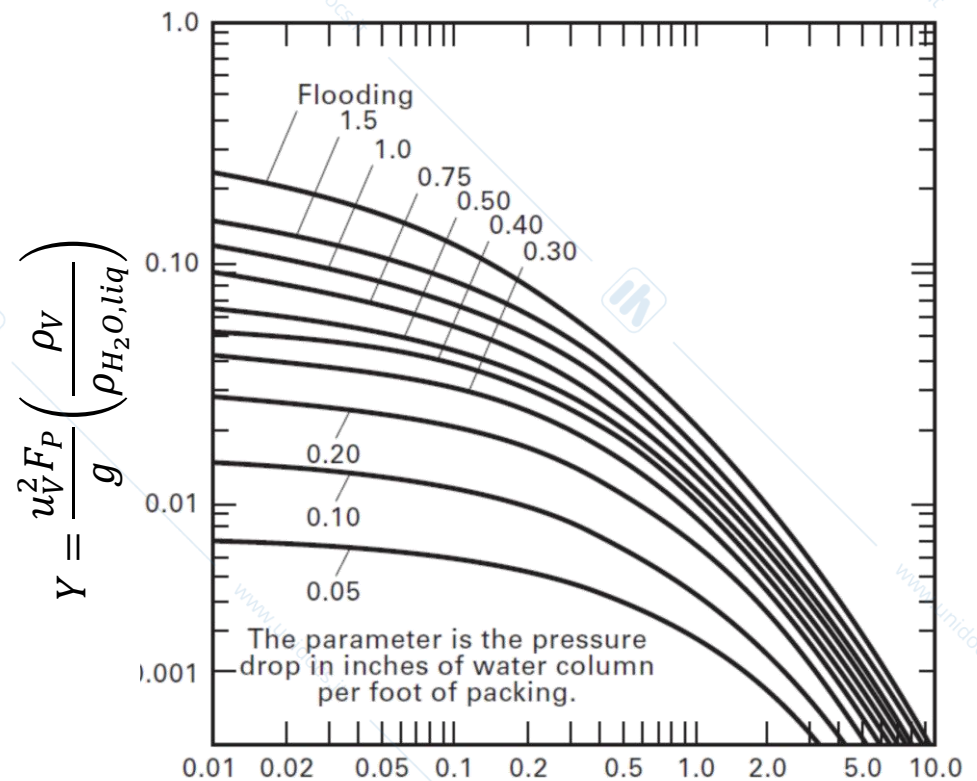
$$f_{v,f} = 0.6$$

Fattore di packing  $F_p$ :

$$F_p = \frac{a}{\epsilon^3}$$

a = area superficiale specifica del packing

$\epsilon$  = packed-column void fraction



$$X = F_{LV} = \frac{L' M_L}{V' M_V} \sqrt{\left( \frac{\rho_v}{\rho_L} \right)}$$

# Separazione per Assorbimento: Colonne a riempimento

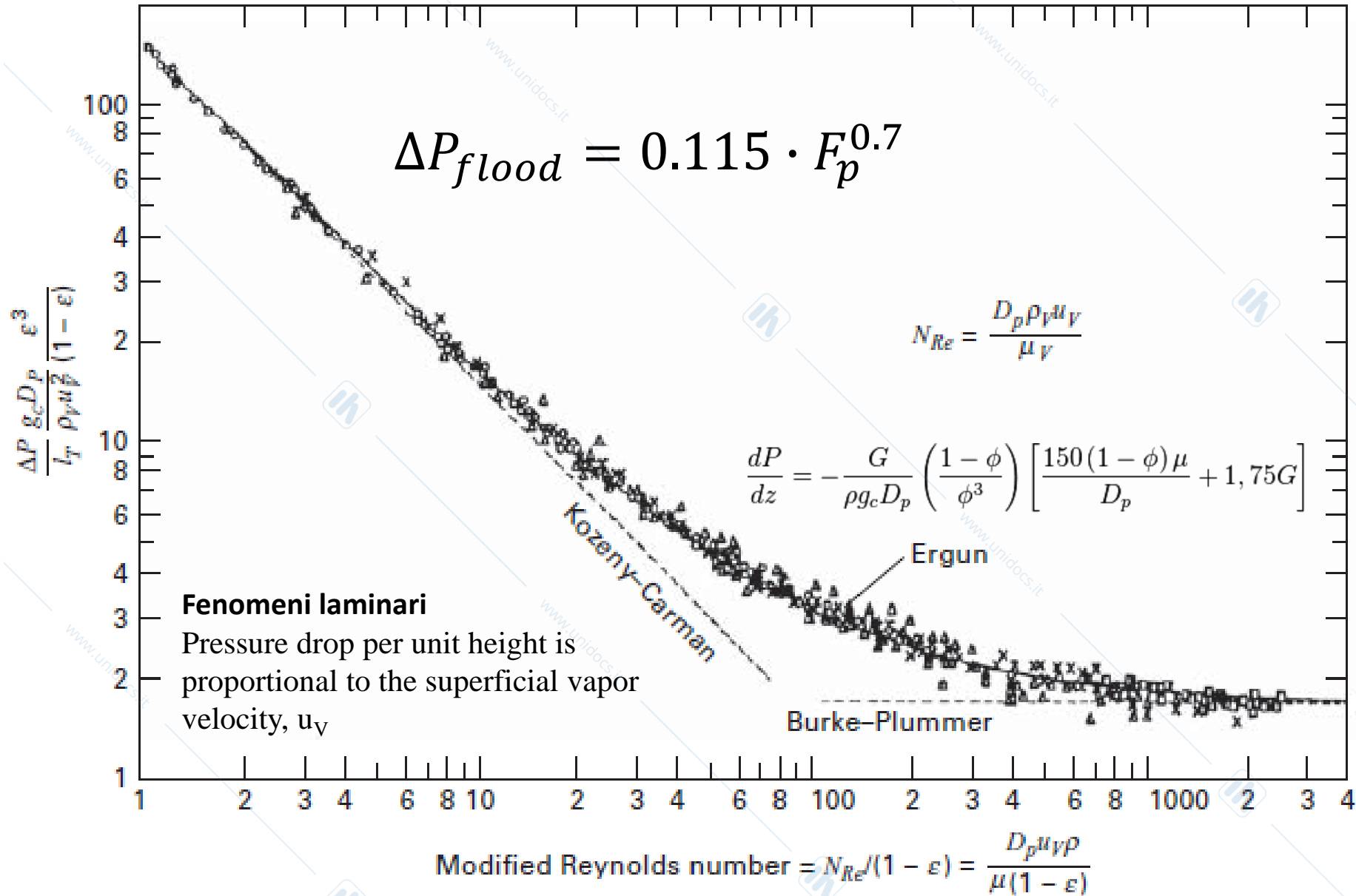
Packing	Material	Size	$F_p$ , ft <sup>2</sup> /ft <sup>3</sup>	$a$ , m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>	$\epsilon$ , m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
Raschig ring	Carbon	25 mm		202.2	0.720
Raschig ring	Ceramic	25 mm	179	190.0	0.680
Raschig ring	Ceramic	15 mm	380	312.0	0.690
Raschig ring	Ceramic	10 mm	1,000	440.0	0.650
Raschig ring	Ceramic	6 mm	1,600	771.9	0.620
Raschig ring	Metal	15 mm	170	378.4	0.917
Tellerette	Plastic	25 mm	40	190.0	0.930
Top-Pak ring	Aluminum	50 mm		105.5	0.956
VSP ring	Metal	50 mm, no. 2		104.6	0.980
VSP ring	Metal	25 mm, no. 1		199.6	0.975
<b>Structured Packings</b>					
Euroform	Plastic	PN-110		110.0	0.936
Gempak	Metal	A2 T-304		202.0	0.977
Impulse	Ceramic	100		91.4	0.838
Impulse	Metal	250		250.0	0.975
Koch-Sulzer	Metal	CY	70		
Koch-Sulzer	Metal	BX	21		
Mellapak	Plastic	250 Y	22	250.0	0.960
Montz	Metal	B1-100		100.0	0.987
Montz	Metal	B1-200		200.0	0.979
Montz	Metal	B1-300	33	300.0	0.930
Montz	Plastic	C1-200		200.0	0.954
Montz	Plastic	C2-200		200.0	0.900
Ralu Pak	Metal	YC-250		250.0	0.945

$$u_V = f_{v,f} \sqrt{Y \frac{g}{F_P} \left( \frac{\rho_{H_2O,liq}}{\rho_V} \right)}$$

$$F_P = \frac{a}{\epsilon^3}$$

$$D_T = \sqrt{\frac{4V'M_V}{f \cdot \pi u_V \rho_V}} = \sqrt{\frac{4V'M_V}{0.8 \cdot \pi u_V \rho_V}}$$

$$A_T = \pi \cdot \frac{D_T^2}{4}$$



www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari

www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari