

Operación de torre de absorción

IIQ2023 - Operaciones Unitarias II

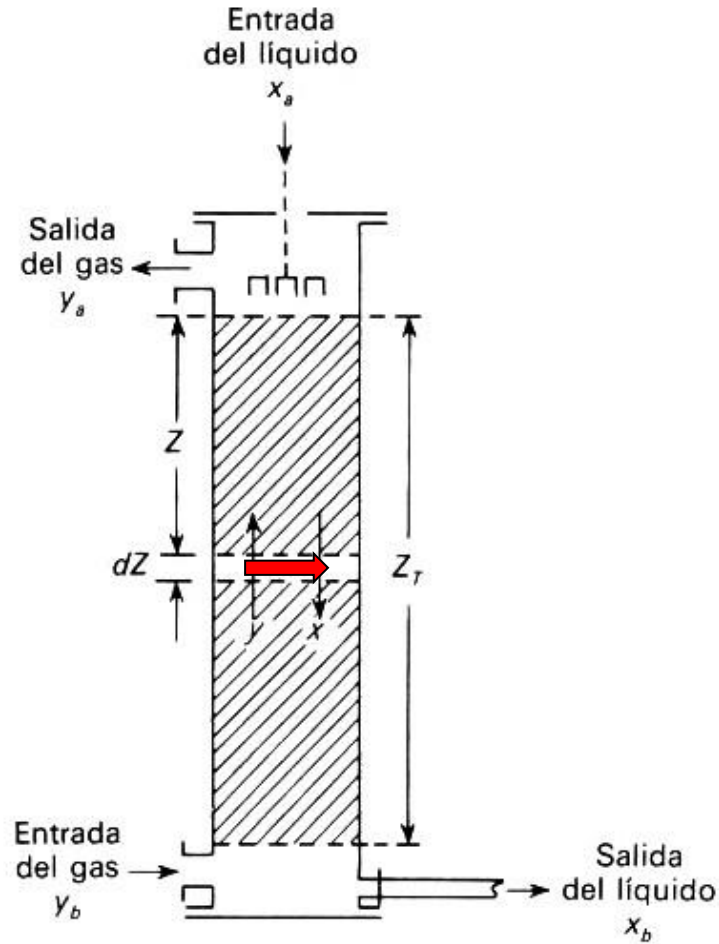
José Rebolledo Oyarce

6 de Mayo de 2021

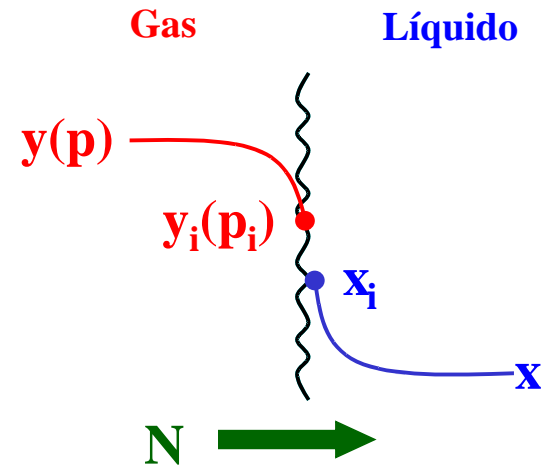


- Recordatorio de Clase Anterior
- Objetivos de la Clase
- Torre de Absorción
 - Línea de Operación
 - Concepto de Unidades de Transferencia
 - Relleno de la Torre de Absorción
 - Caída de Presión en la Torre de Absorción

Absorción de un vapor diluido

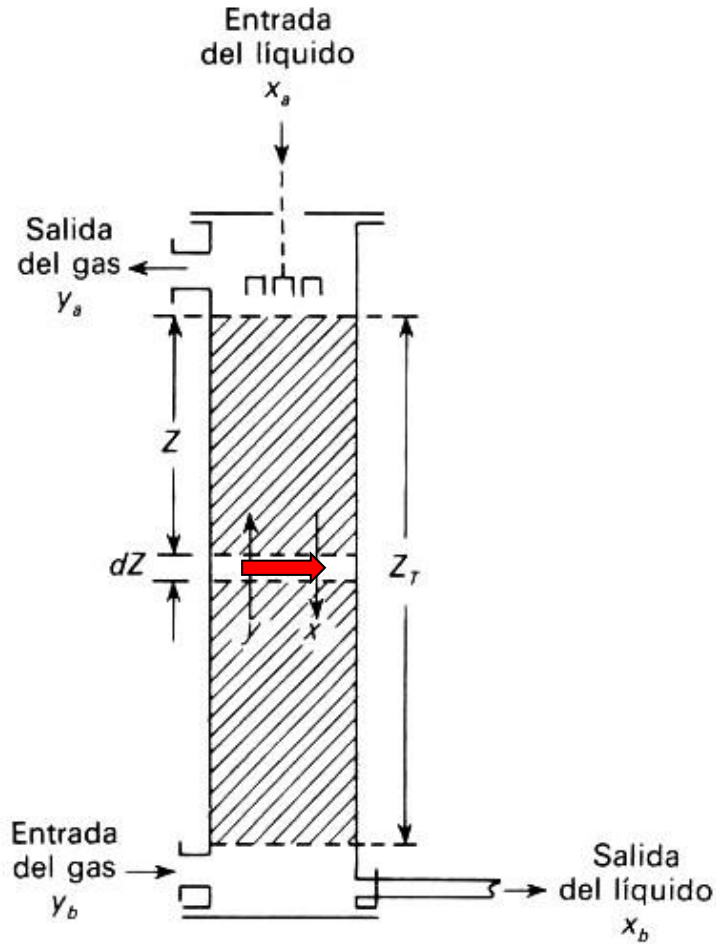


$$-\frac{V}{A} \frac{dy}{dz} = N \cdot a$$



$$Z_T = \frac{V}{AK_G a P} \int_{y_b}^{y_a} \frac{dy}{(y^* - y)}$$

Absorción de un vapor diluido



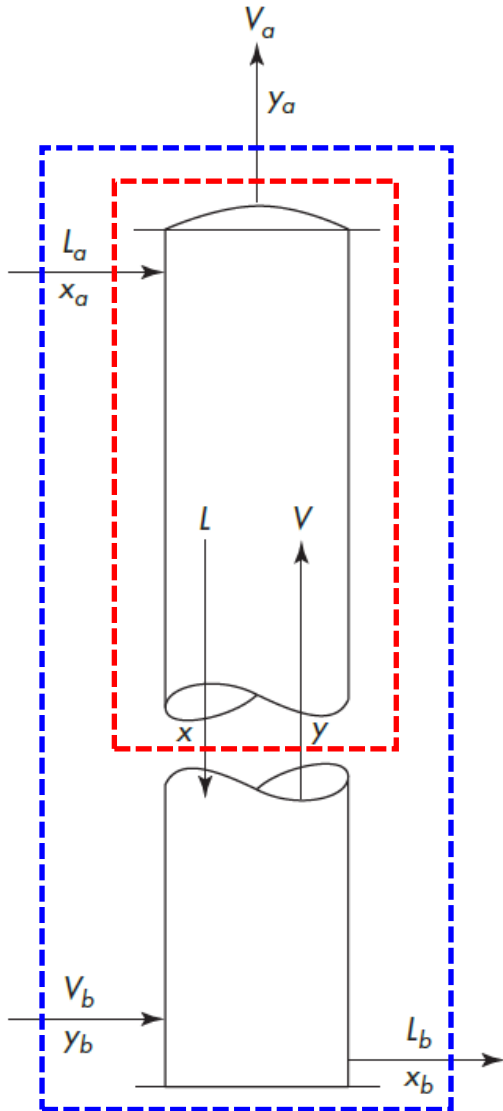
$$x = x_b + \frac{V}{L}(y - y_b) \quad y^* = H'x$$



$$Z_T = \frac{V}{AK_G a P} \left\{ \frac{1}{1 - \frac{H'V}{L}} \right\} \ln \left\{ \frac{y_b - H'x_b}{y_a - H'x_a} \right\}$$

- Comprender los conceptos de altura de una unidad de transferencia y de número de unidades de transferencia.
- Comprender aspectos de diseño adicionales de una torre de absorción.

¿Qué ocurre a lo largo de la torre?



El balance de materia de la envolvente es:

Balance Global de Materia

$$L_a + V = L + V_a$$

Balance de Materia del compuesto A

$$L_a x_{A,a} + V y_A = L x_A + V_a y_{A,a}$$

Donde tenemos que el balance completo el sistema está comprendido en la ecuación anterior ya que el balance global es:

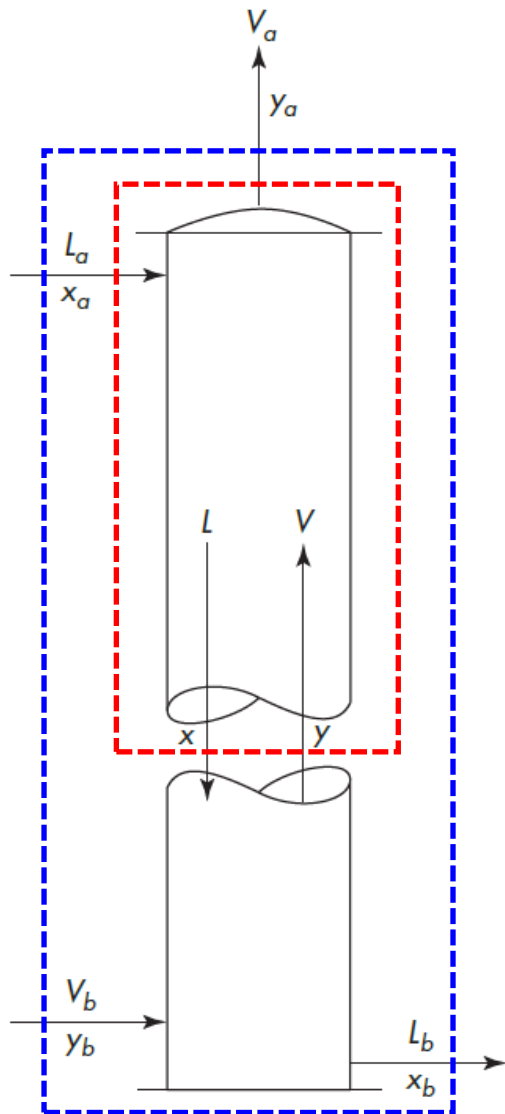
Balance Global de Materia

$$L_a + V_b = L_b + V_a$$

Balance de Materia del compuesto A

$$L_a x_{A,a} + V_b y_{A,b} = L_b x_{A,b} + V_a y_{A,a}$$

¿Qué ocurre a lo largo de la torre?



Entonces a partir de la ecuación de balances de la envolvente roja:

Balance de Materia del compuesto A

$$L_a x_{A,a} + V y_A = L x_A + V_a y_{A,a}$$

Tenemos lo siguiente:

Línea de Operación

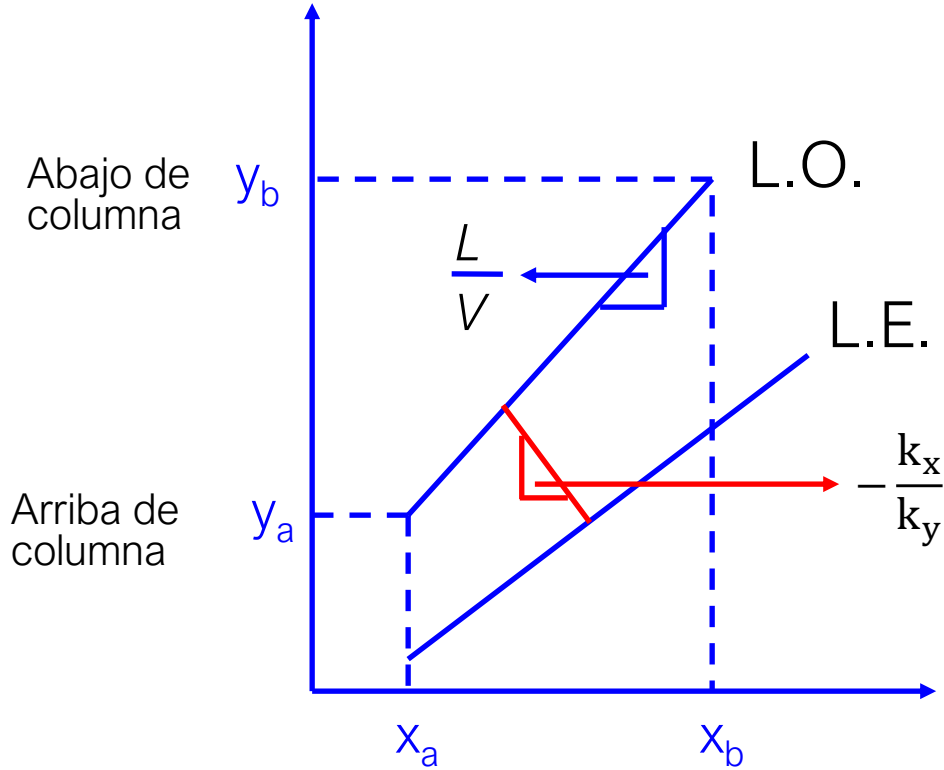
$$y = \frac{L}{V} x + \frac{V_a y_a - L_a x_a}{V}$$

Línea de Operación para gases diluidos (V y L constantes)

$$y = \frac{L}{V} x + \frac{V y_a - L x_a}{V}$$

Gráficamente...

En cada punto de la columna se tiene:



$$N = k_x(x_i - x)$$

$$N = k_y(y - y_i)$$

$$\Rightarrow \frac{y - y_i}{x - x_i} = -\frac{k_x}{k_y}$$

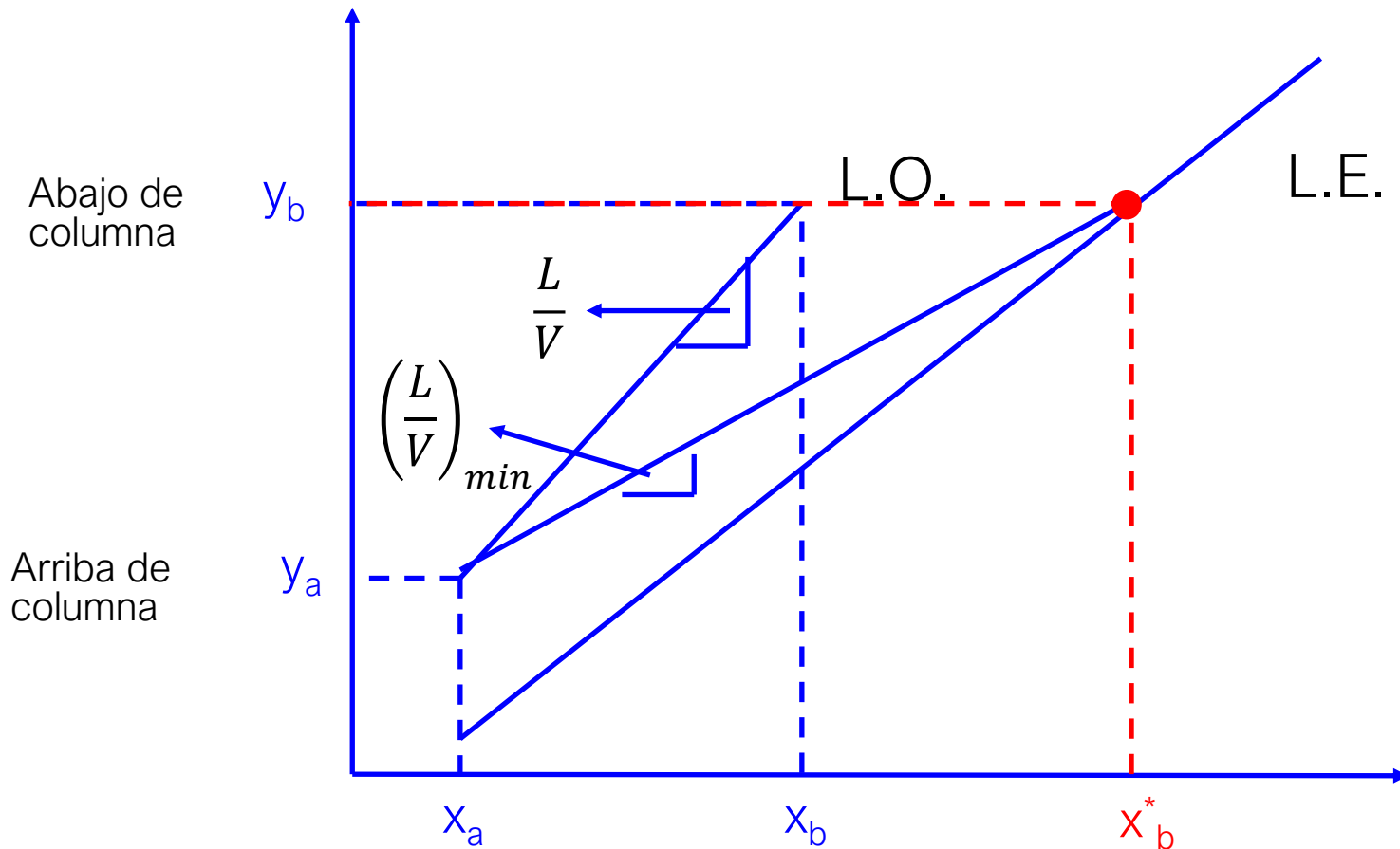
Absorción: L.O. siempre está por arriba

Desorción: L.O. siempre está por debajo

L.O. Indica la relación entre la concentración en el gas y en el líquido en cualquier nivel de la torre.

L.E. se obtiene de la Ley de Henry.

Relación de Gas-Líquido Mínima



Bajo esta relación de Gas-Líquido mínimo se necesitaría una altura infinita de la torre para obtener el resultado requerido, ya que en el fondo de la columna no hay diferencia de concentración (no hay fuerza motriz)

Para la altura Z_T de la torre de absorción vimos que era posible integrar analíticamente la expresión, y encontrar Z_T , expresión que depende de la separación que se quiere efectuar (i.e. de los límites de la integral y_a e y_b).

La ecuación se puede ver de otra manera:

$$Z_T = \frac{V}{AK_G a P} \int_{y_a}^{y_b} \frac{dy}{(y - y^*)}$$

↓
↓

Cte. → depende de capacidad de T de M del equipo
Función de separación a efectuar

$\int \approx \frac{\text{Variación en la [c] vapor en la columna}}{\text{Fuerza impulsora media}}$

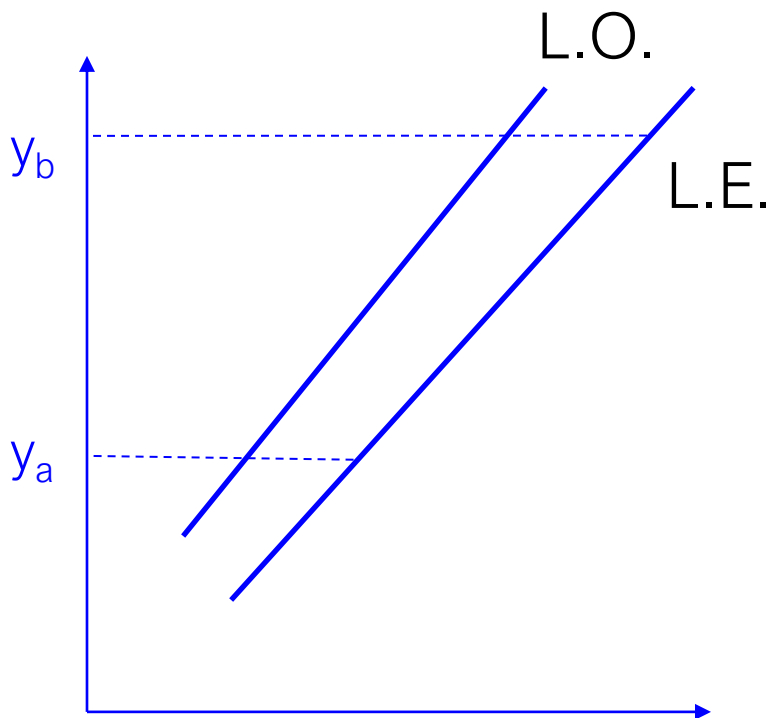
$$Z_T = \underbrace{\frac{V}{AK_G a P}}_{(\text{HTU})_{\text{OG}}} \underbrace{\int_{y_a}^{y_b} \frac{dy}{(y - y^*)}}_{(\text{NTU})_{\text{OG}}}$$

$(\text{HTU})_{\text{OG}}$ es la “altura de una unidad de transferencia” [unidades de longitud, m]

$(\text{NTU})_{\text{OG}}$ es el “número de unidades de transferencia”

$$Z_T = \underbrace{\frac{V}{AK_G a P}}_{(HTU)_{OG}} \underbrace{\int_{y_a}^{y_b} \frac{dy}{(y - y^*)}}_{(NTU)_{OG}}$$

Si en el rango de operación tanto las curvas de operación y equilibrios son líneas rectas, se permite utilizar un valor medio de la fuerza impulsora sobre la columna.



Para gases diluidos, tenemos que la ecuación diferencial era:

$$-\frac{V}{A} \frac{dy}{dz} = N \cdot a$$

Pero, si utilizamos ley de Henry y coeficientes de transferencia determinamos que:

$$\frac{V}{A} dy = K_G a P (y^* - y) dz$$

Pero, si utilizamos ley de Henry y coeficientes de transferencia determinamos que:

$$\frac{V}{A} dy = K_G a P (y^* - y) dz$$

Pero, como las curvas de equilibrio es una líneas rectas podemos decir que la ecuación que la define es:

$$y^* = mx + n$$

Entonces:

$$y_b^* = mx_b + n$$

y

$$y_a^* = mx_a + n$$

Por lo tanto,

$$m = \frac{y_a^* - y_b^*}{x_a - x_b}$$

Adicionalmente, como la línea de operación también es una línea recta tenemos que la ecuación que la define:

$$y = \frac{L}{V}x + \frac{V_b y_b - L_b x_b}{V}$$

Se puede reducir a:

$$x = x_b - \frac{V}{L}(y - y_b)$$

Con ello si volvemos a nuestra ecuación de balance diferencial en la torre de absorción:

$$\int_0^{z_T} \frac{AK_G aP}{V} dz = \int_{y_a}^{y_b} \frac{dy}{(y^* - y)}$$

$$\int_0^{z_T} \frac{AK_G aP}{V} dz = \int_{y_a}^{y_b} \frac{dy}{m \left[x_b - \frac{V}{L}(y - y_b) \right] + n - y}$$

$$\int_0^{Z_T} \frac{AK_G aP}{V} dz = \int_{y_a}^{y_b} \frac{dy}{m \left[x_b - \frac{V}{L} (y - y_b) \right] + n - y}$$

$$\int_0^{Z_T} \frac{AK_G aP}{V} dz = \frac{y_b - y_a}{(y_b - y_b^*) - (y_a - y_a^*)} \ln \left[\frac{y_b - y_b^*}{y_a - y_a^*} \right]$$

Por lo tanto, se dice que la expresión de unidades de transferencia $(NTU)_{OG}$ viene dado por la media logarítmica entre $(y_b - y_b^*)$ y $(y_a - y_a^*)$. Tal que:

$$\int_{y_a}^{y_b} \frac{dy}{(y - y^*)} = \frac{y_b - y_a}{\Delta y_{lm}}$$

Donde,

$$\Delta y_{lm} = \frac{(y_b - y_b^*) - (y_a - y_a^*)}{\ln \{ (y_b - y_b^*) / (y_a - y_a^*) \}} = \frac{(Fza. Impulsora)_{abajo} - (Fza. Impulsora)_{arriba}}{\ln \{ \% \}}$$

El subíndice OG es para recordar que el cálculo está basado en la fuerza impulsora basada en la fase gaseosa.

Un método sencillo de diseño consiste en determinar $(NTU)_{OG}$ a partir de un diagrama x-y y multiplicarlo por el valor de $(HTU)_{OG}$ para obtener el alto de la columna.

$(HTU)_{OG}$ se puede obtener de la bibliografía para un sistema en particular o de ensayos realizados en planta piloto.

Conceptos Importantes: Relleno de la Torre (Irregulares)



Anillos Raschig



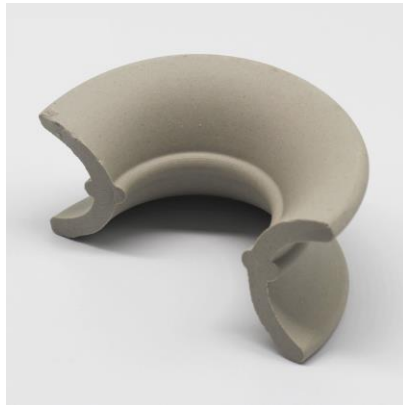
Anillos plásticos
Pall



Anillos metálicos
Pall



Montura Berl



Montura de
cerámica Intalox



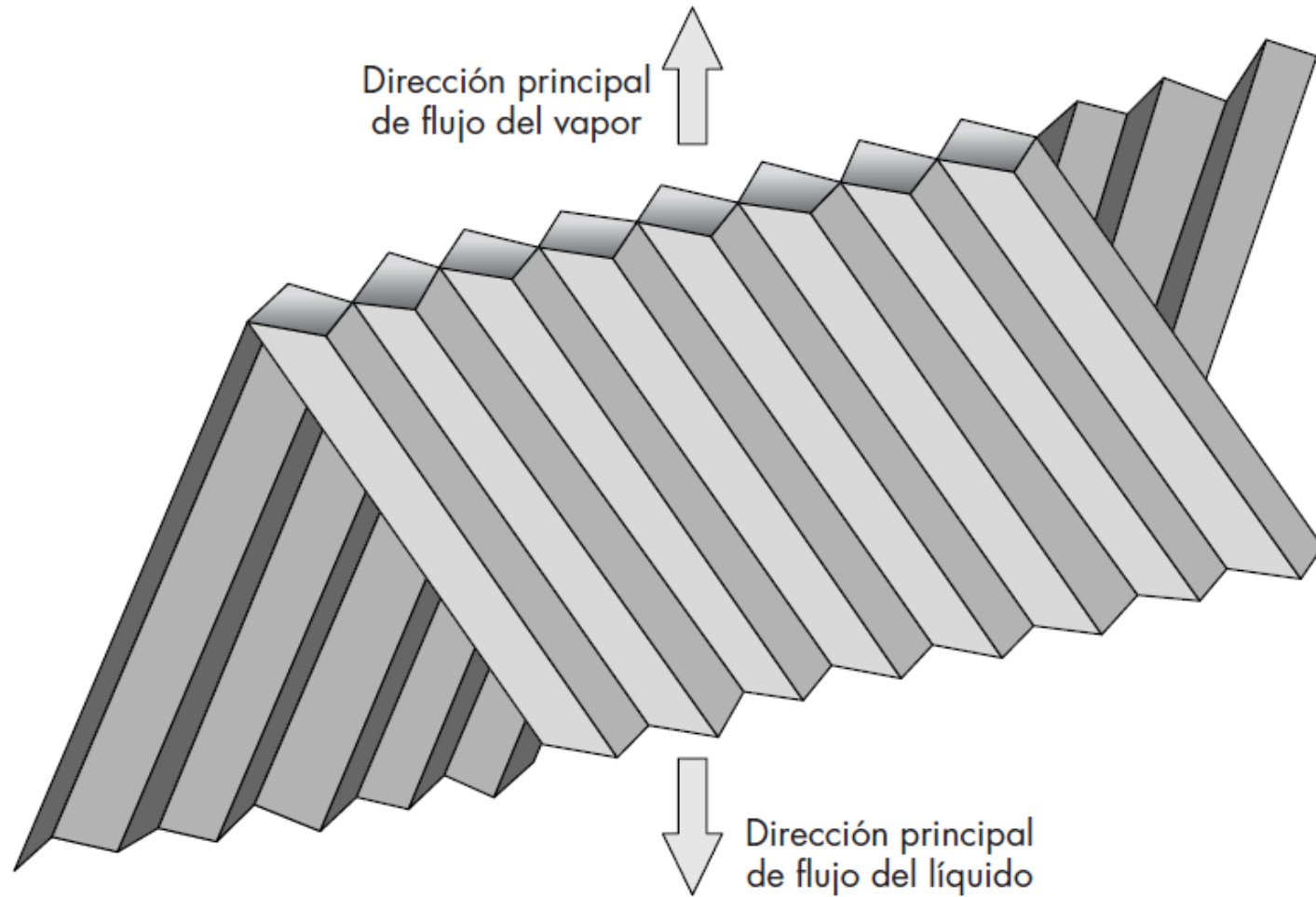
Montura de plástica
Super Intalox



Montura de metálica
Super Intalox

Sulzer (2021), Raschig (2021)

Conceptos Importantes: Relleno de la Torre (Regulares)



Conceptos Importantes: Relleno de la Torre (Regulares)



Empaque Gauze

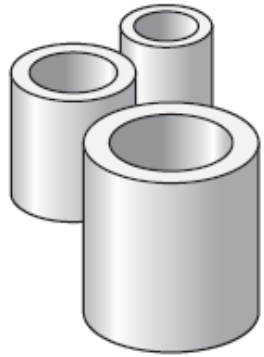
Empaque Flexipac



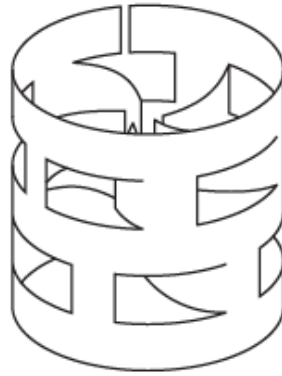
Sulzer (2021), Koch-Glitsch (2021)

Conceptos Importantes: Relleno de la Torre

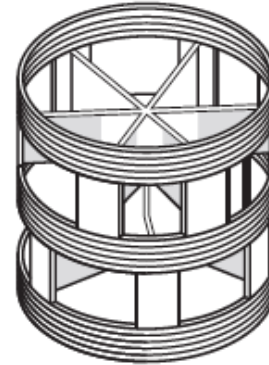
Generalmente, la torre se rellena con cuerpos sólidos pequeños (entre 0.6 y 7.5 cm en su dimensión mayor) distribuidos al azar.



Anillos Raschig



Anillos metálico
Pall



Anillos plástico
Pall

El objetivo principal del relleno es **proporcionar una gran área de contacto entre el líquido y el gas**. Además, debe ser:

- Químicamente inerte frente a los fluidos que circulan
- Resistente mecánicamente sin tener un peso excesivo
- Ofrecer una resistencia mínima al flujo de ambos fluidos
- Barato

Conceptos Importantes: Relleno de la Torre

Tipo	Material	Tamaño, nominal, in.	Densidad global, [†] lb/ft ³	Área total, [†] ft ² /ft ³	Porosidad ε	Factores de empaquet [‡]	
						F_p	f_p
Anillos Raschig	Cerámica	$\frac{1}{2}$	55	112	0.64	580	1.52§
		$1\frac{1}{2}$	42	58	0.74	155	1.36§
		$1\frac{1}{2}$	43	37	0.73	95	1.0
		2	41	28	0.74	65	0.92§
Anillos Pall	Metal	1	30	63	0.94	56	1.54
		$1\frac{1}{2}$	24	39	0.95	40	1.36
		2	22	31	0.96	27	1.09
	Plástico	1	5.5	63	0.90	55	1.36
		$1\frac{1}{2}$	4.8	39	0.91	40	1.18
Monturas Berl	Cerámica	$\frac{1}{2}$	54	142	0.62	240	1.58§
		1	45	76	0.68	110	1.36§
		$1\frac{1}{2}$	40	46	0.71	65	1.07§
Monturas Intalox	Cerámica	$\frac{1}{2}$	46	190	0.71	200	2.27
		1	42	78	0.73	92	1.54
		$1\frac{1}{2}$	39	59	0.76	52	1.18
		2	38	36	0.76	40	1.0
		3	36	28	0.79	22	0.64
Monturas Super Intalox	Cerámica	1	—	—	—	60	1.54
		2	—	—	—	30	1.0
IMTP	Metal	1	—	—	0.97	41	1.74
		$1\frac{1}{2}$	—	—	0.98	24	1.37
		2	—	—	0.98	18	1.19
Hy-Pak	Metal	1	19	54	0.96	45	1.54
		$1\frac{1}{2}$	—	—	—	29	1.36
		2	14	29	0.97	26	1.09

[†] La densidad global y el área total están referidas a la unidad de volumen de la columna.

[‡] El factor F_p es un factor de caída de presión y el factor f_p es un coeficiente relativo de transferencia de materia. El factor f_p se estudia en la página 632 en el apartado "Funcionamiento de otros empaques". Su uso se ilustra en el ejemplo 18.7.

[§] Con base en datos de $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$; los demás factores se basan en datos de $\text{CO}_2\text{-NaOH}$.

Conceptos Importantes: Contacto entre el líquido y el gas

Idealmente se quiere obtener que una película delgada de líquido cubra la superficie del relleno durante el descenso a lo largo de la torre.

En la realidad, las películas de líquido tienden a variar de espesor en las diferentes zonas de la torre, de tal manera que el líquido termina formando pequeñas corrientes que fluyen a lo largo de la torre en trayectorias localizadas.

Este efecto se le conoce como **canalización** y es la principal razón del mal funcionamiento de las torres empacadas, en especial, las más grandes (altas).

En particular, en torres grandes, la canalización es más grave al utilizar empaques ordenados.

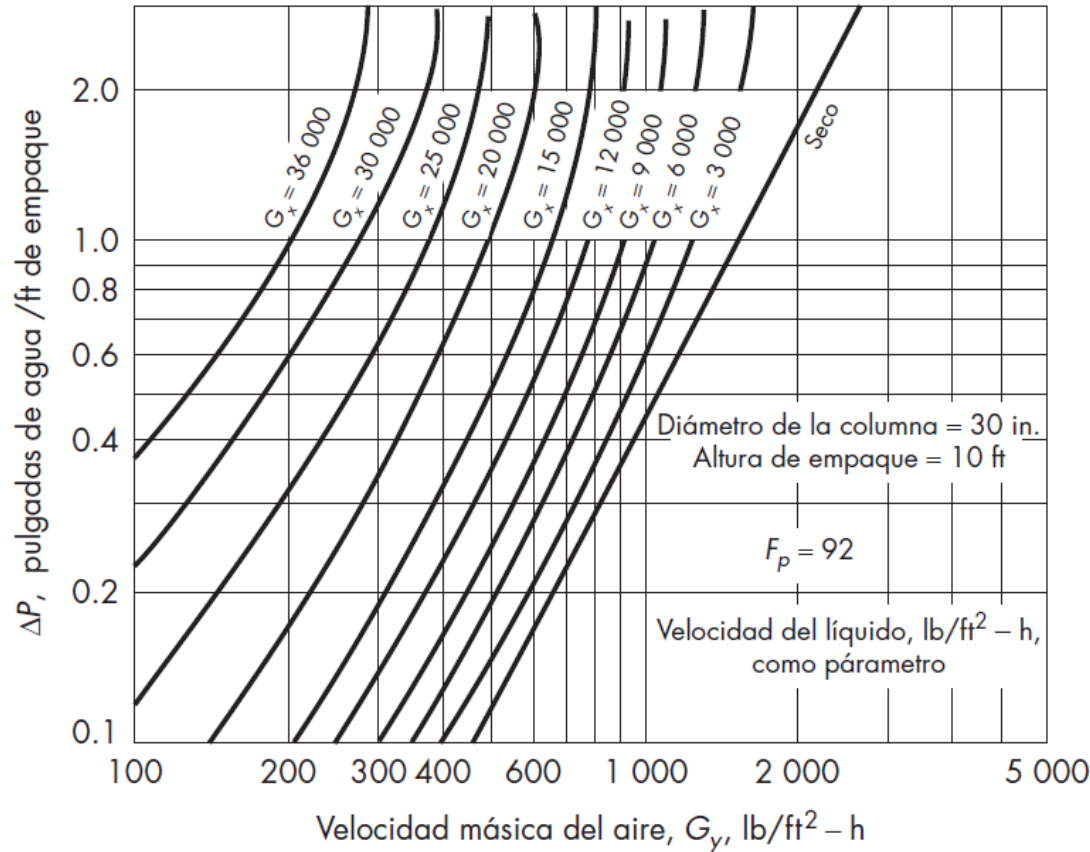
Conceptos Importantes: Contacto entre el líquido y el gas

Como minimizar la canalización:

- Considerar relación $D_{\text{torre}}/D_{\text{relleno}}$. Si $D_{\text{torre}}/D_{\text{relleno}} < 8$, el líquido tiende a desplazarse hacia afuera y descender por la pared de la columna.
Es preferible mantener la razón $D_{\text{torre}}/D_{\text{relleno}} \geq 8$
- Controlar la velocidad del líquido. Al aumentar la velocidad del líquido aumenta la superficie mojada hasta alcanzar una velocidad crítica en que toda la superficie es efectiva.
- Incluir redistribuidores de líquido a lo largo de la columna.
En torres grandes, por lo general se incluyen redistribuidores para el líquido cada 5 o 10 m de la torre, sobre todo inmediatamente por encima de cada sección empacada.

Conceptos Importantes: Velocidad de Inundación

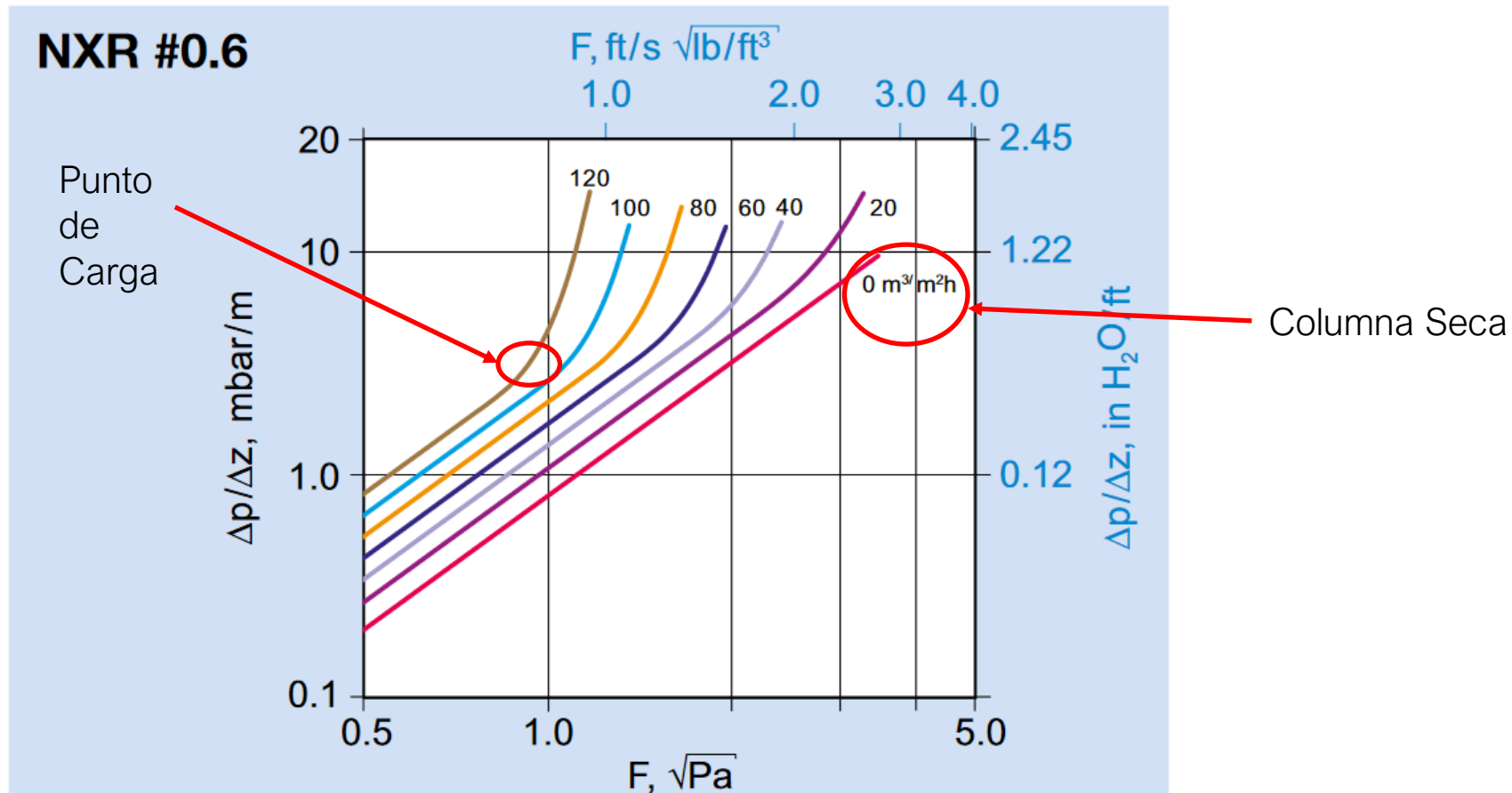
Una medida importante es la caída de presión por longitud de empaque versus el flujo másico de gas que se inyecta a la columna por sección transversal de la columna.



G_x = velocidad másica del líquido (lb/pie²-h)

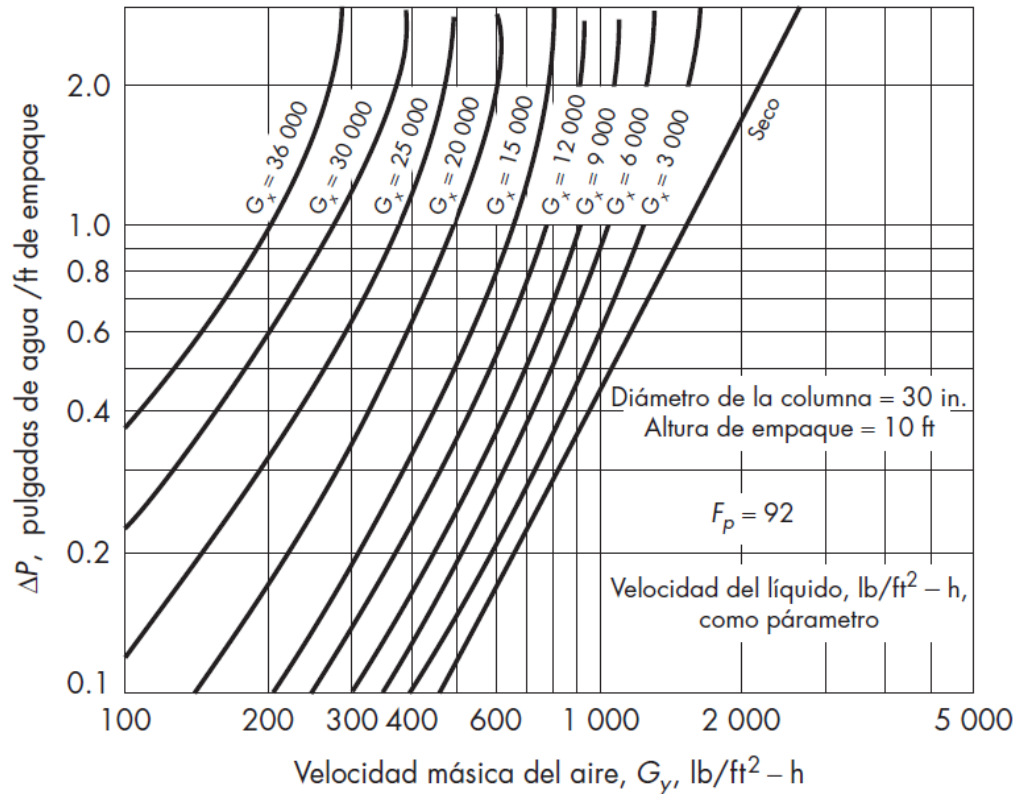
Conceptos Importantes: Velocidad de Inundación

Existen dos conceptos importantes en esta curva de caída de presión. La identificación de la curva cuando la **columna está seca** y los **puntos de carga** que existen a diferentes condiciones



Conceptos Importantes: Velocidad de Inundación

Si una torre tiene un determinado relleno y está irrigada con un cierto flujo definido de líquido, existe un límite para la velocidad del gas, que define la velocidad de inundación.



G_x = velocidad másica del líquido
(lb/pie²-h)



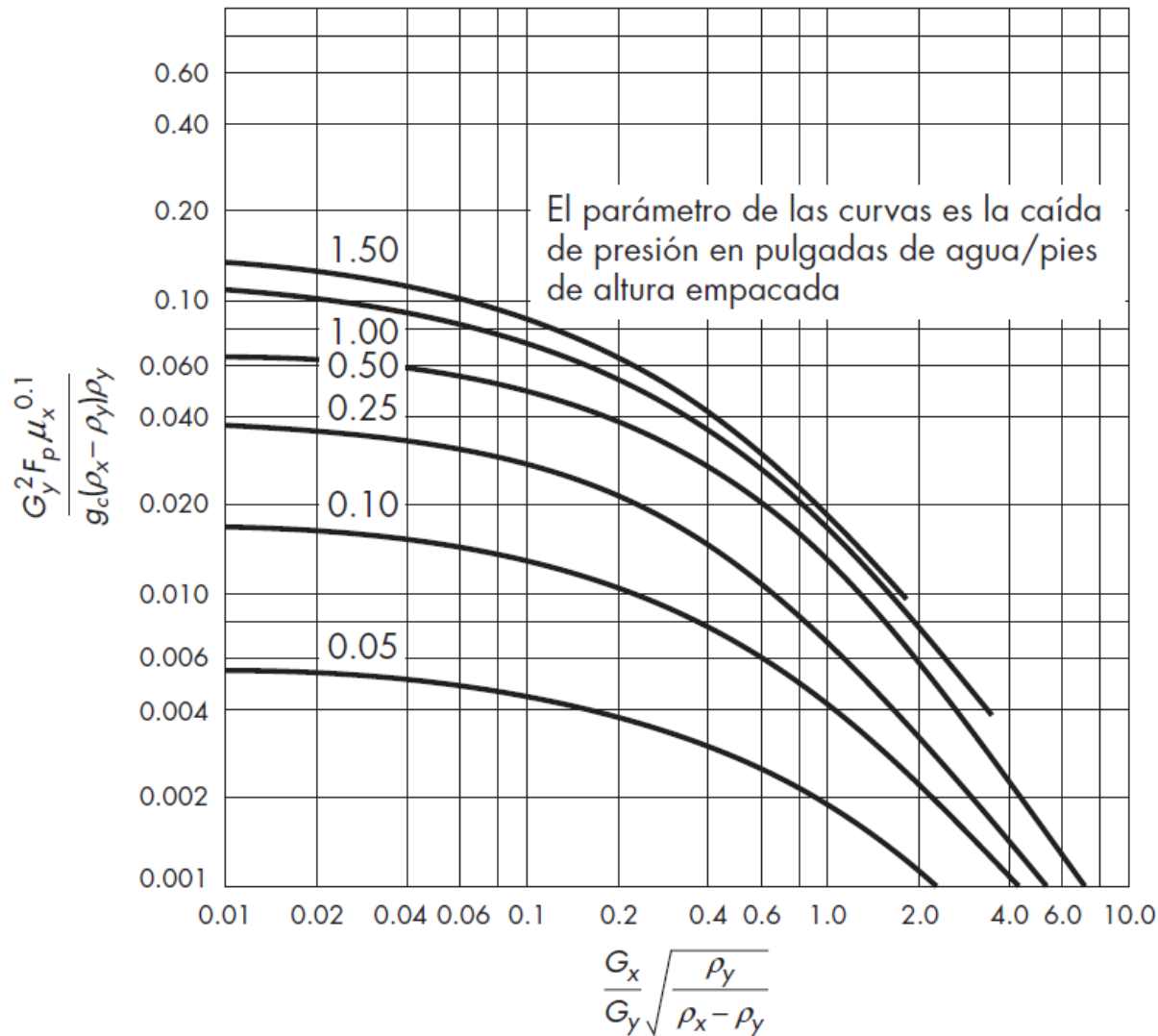
G_y < velocidad de inundación.

Generalmente $G_y = \frac{1}{2} G_{y \text{ inundación}}$

Una ecuación empírica para encontrar ΔP de inundación es:

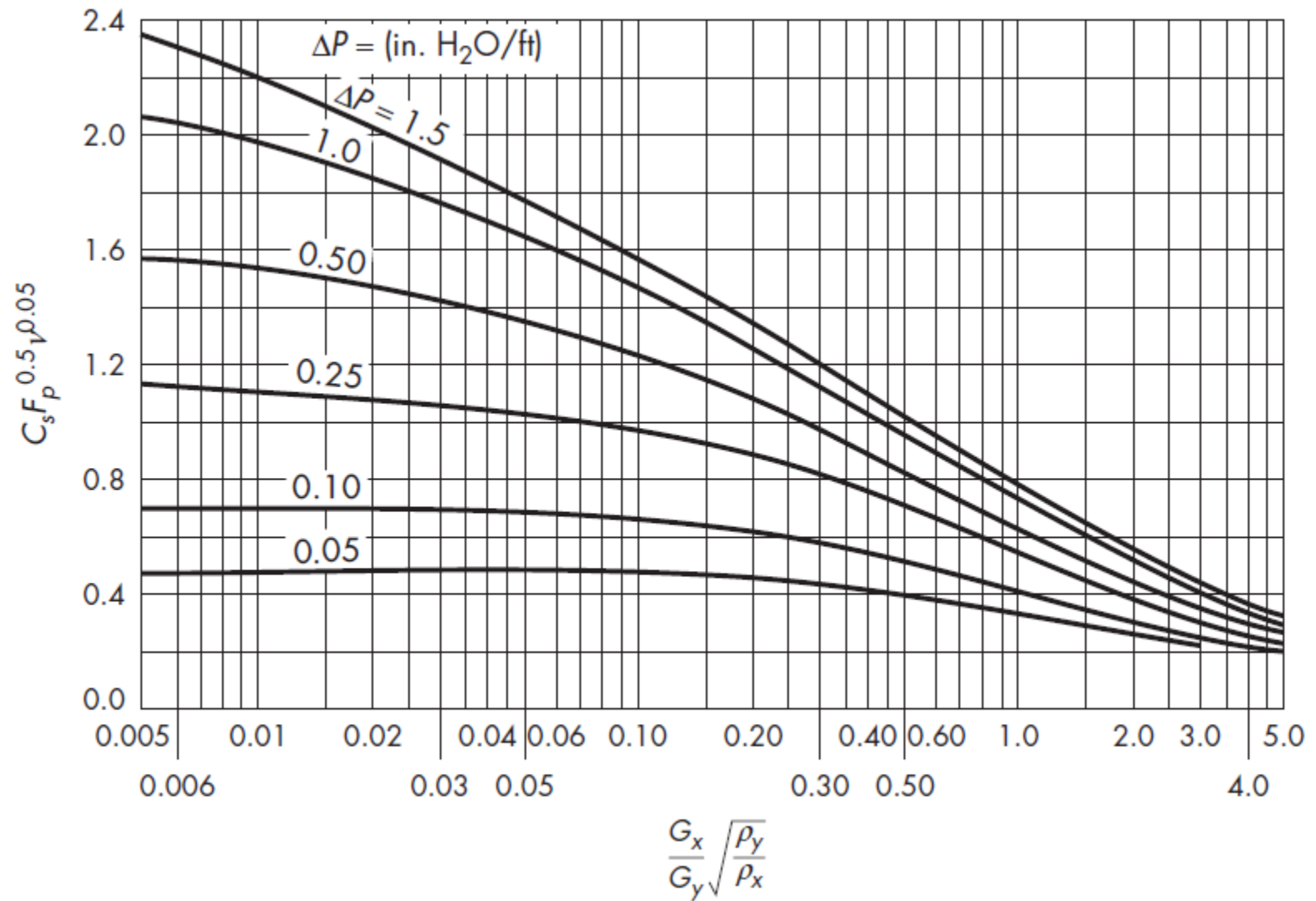
$$\Delta P_{\text{inundación}} = 0.115 F_p^{0.7}$$

Una factores de empaque F_p entre 10 y 60. Para F_p mayores la caída de presión se asume como 2 in H₂O/ft



La información anterior se puede resumir en el siguiente gráfico, para distintas combinaciones de flujos de líquido y gas. Este gráfico se utiliza para estimar velocidades de inundación y caídas de presión.

donde G_x = velocidad másica del líquido, lb/pie²-s
 G_y = velocidad másica del gas, lb/pie²-s
 F_p = factor de relleno, pie⁻¹
 ρ_x = densidad del líquido, lb/pie³
 ρ_y = densidad del gas, lb/pie³
 μ_x = viscosidad del líquido, cP
 g_c = factor de proporcionalidad de la ley de Newton, 32,174 pies-lb/lb_f-s²



donde $C_s = u_0 \sqrt{\frac{\rho_y}{\rho_x - \rho_y}}$

- Comprender los conceptos de altura de una unidad de transferencia y de número de unidades de transferencia.
- Comprender aspectos de diseño adicionales de una torre de absorción.

Operación de torre de absorción

IIQ2023 - Operaciones Unitarias II

José Rebolledo Oyarce

6 de Mayo de 2021

