

UNIDAD 5

OPERACIONES CON SOLIDOS



Contenido

Operaciones en las que intervienen partículas de sólidos. Propiedades y tratamiento de las partículas sólidas. Reducción de tamaño. Cristalización. Mezclado de sólidos y pastas. Separaciones mecánicas. Descripción de equipos. Procesos en la industria minera.

Caracterización

Los sólidos son más difíciles de tratar que los líquidos o gases.

Los sólidos presentan diferentes apariencias: piezas angulares, láminas continuas o polvos finamente divididos.

Pueden ser duros y abrasivos, resistentes o gomosos, blandos o frágiles, polvorientos, cohesivos, de fluidez libre o pegajosos.

Importancia

Tienen un impacto significativo en el rendimiento y la eficiencia de los procesos.

Optimización del proceso: Comprender el tamaño, forma, densidad y porosidad de partículas ayuda a optimizar los procesos industriales como la mezcla, compactación, filtración y transporte neumático.

Control de calidad: El conocimiento preciso de las propiedades de las partículas es crucial para garantizar la calidad y consistencia del producto final. Por ejemplo, en la industria farmacéutica, el tamaño y forma precisos de las partículas son fundamentales para garantizar la eficacia del medicamento.

Eficiencia energética: Entender cómo interactúan las partículas con otros materiales en un proceso industrial puede conducir a mejoras significativas en la eficiencia al reducir pérdidas innecesarias.

Ejemplos:

- En la industria alimenticia: La molienda o triturado de ingredientes requiere comprender tanto el tamaño como la forma para lograr texturas o consistencias deseadas.
- En la producción cerámica: La densidad y porosidad son críticas para determinar cómo se comportará una cerámica durante su cocción e influirán directamente en propiedades finales.

Operaciones en las que intervienen partículas de sólidos

Trituración y molienda: implican reducir el tamaño de los sólidos para obtener partículas más pequeñas. Se utilizan molinos, trituradoras y equipos similares.

Mezclado y agitación: Al mezclar diferentes sólidos o combinar sólidos con líquidos, es importante comprender las propiedades de las partículas para lograr una distribución uniforme y evitar la segregación.

Separación: En procesos como la filtración, centrifugación o sedimentación, se utilizan propiedades como el tamaño y la densidad de las partículas para separarlas del medio en el que se encuentran.

Compactación: En actividades como la fabricación de tabletas farmacéuticas o briquetas de carbón, se requiere comprimir los sólidos en forma compacta utilizando presión controlada.

Transporte neumático: El transporte a granel de materiales granulados o pulverizados a través de tuberías mediante aire comprimido depende del comportamiento fluido de las partículas sólidas.

Introducción

De todas las formas y tamaños en que es posible encontrar los sólidos, la partícula pequeña es la más importante desde el punto de vista de la ingeniería química. Es necesario un conocimiento de las características de las masas de los sólidos en forma de partículas para el diseño de procesos y del equipo que opera con corrientes que contienen tales sólidos.

Caracterización de las Partículas Solidas

Las partículas sólidas individuales se caracterizan por su tamaño, forma y densidad.

Sólidos homogéneos = densidad que el material original

Partículas del rompimiento de un sólido compuesto –
Distintas densidades Ej. Mena.

El tamaño y la forma se especifican fácilmente para partículas regulares, tales como esferas y cubos, pero en el caso de partículas irregulares (como granos de arena) los términos tamaño y forma no resultan tan claros y es preciso definirlos de manera arbitraria.

Forma de las partículas

La partícula individual se puede expresar convenientemente en términos de la esfericidad Φ_s , *que es independiente del tamaño de la partícula.*

D_p es el diámetro de la partícula esférica y su esfericidad $\Phi_s = 1$ *para una partícula no esférica, la esfericidad se define como:*

$$\Phi_s \equiv \frac{6/D_p}{S_p/v_p}$$

Donde:

D_p = *diámetro nominal de partícula*

S_p = *área superficial de una partícula*

v_p = *volumen de una partícula*



Tamaño de las partículas

Es posible especificar “diámetros” para cualquier partícula equidimensional.

Las partículas que no son equidimensionales, es decir, que son más largas en una dirección que en otras, algunas veces se caracterizan por la *segunda dimensión de mayor* longitud.

Por convención, los tamaños de las partículas se expresan en diferentes unidades dependiendo del intervalo de tamaños que intervienen.

Las **partículas gruesas** se miden en **pulgadas o milímetros**,

las **partículas finas** en función de la abertura del tamiz,

Las partículas muy finas en micrómetros o nanómetros.

$$1 \text{ m} = 10^3 \text{ mm} = 10^6 \text{ }\mu\text{m} = 10^9 \text{ nm} = 10^{12} \text{ pm}$$

Tabla de Tamices Estándar Tyler

MALLA	ABERTURA DE TAMIZ (mm)
3	6,680
4	4,699
6	3,327
8	2,362
10	1,651
14	1,168
20	0,833
28	0,589
35	0,417
48	0,295
65	0,208
100	0,147
150	0,104
200	0,074



Tamaños de partículas mezcladas y análisis de tamaños

En una muestra de partículas uniformes:

$$N = m / \rho_p u_p$$

D_p = es el diámetro de las partículas

m = masa total de la muestra

ρ_p = densidad de las partículas

m/ρ_p = volumen total de las partículas

u_p = volumen de una partícula

N = número de partículas

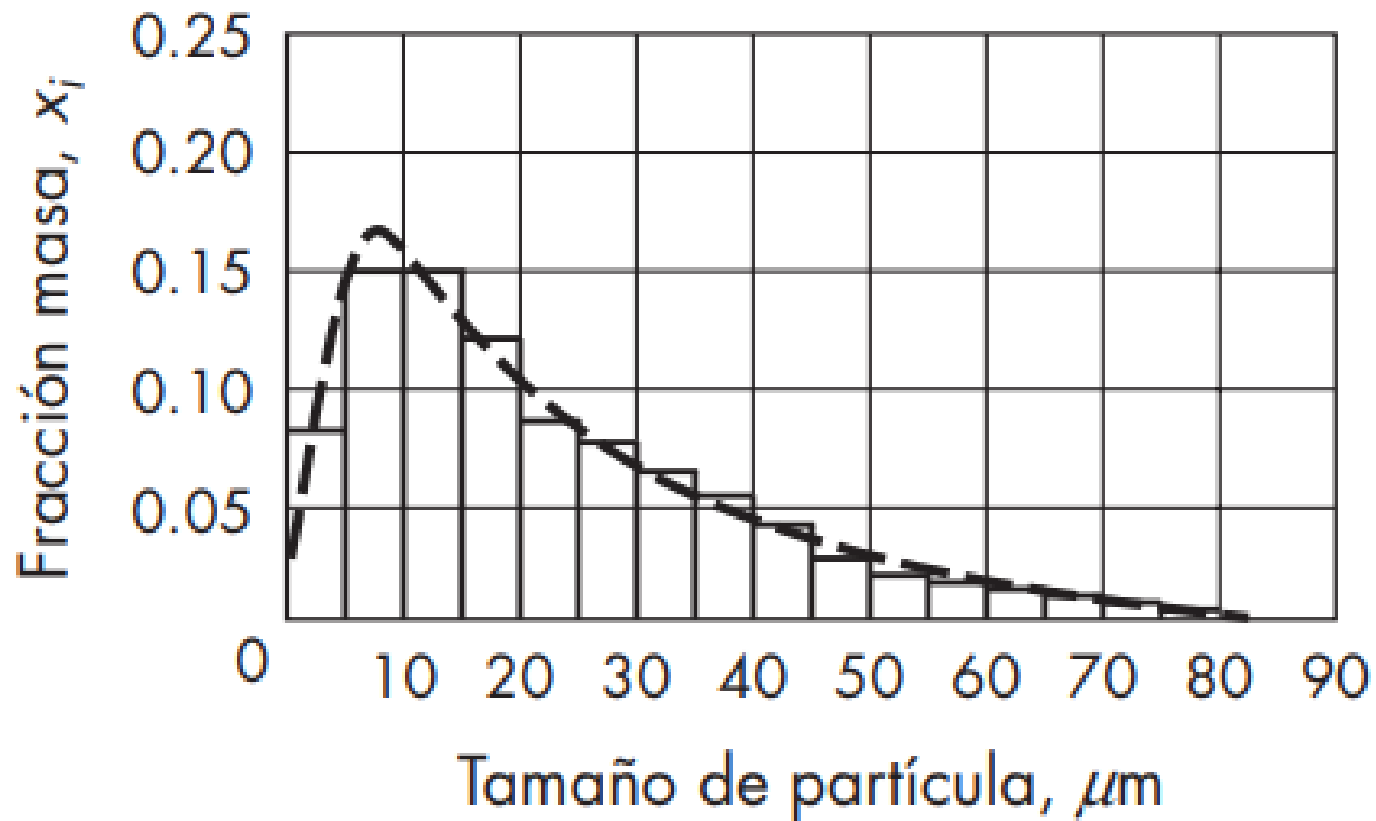
S_p = superficie de 1 partícula

$$A = NS_p = 6m/\Phi_s \rho_p D_p$$



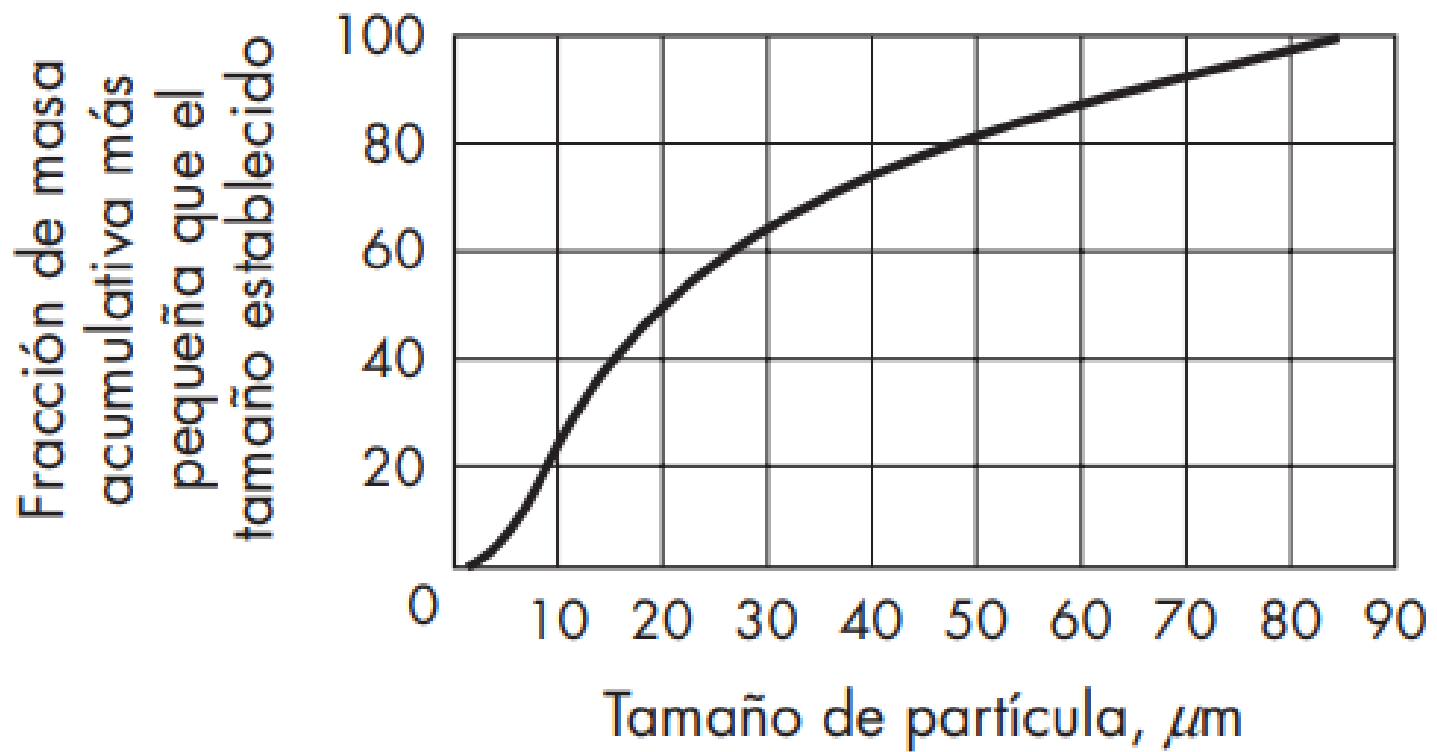
Análisis diferencial

Cribado o tamizado



Análisis acumulativo

Cribado o tamizado



Superficie especifica de una mezcla

Área de la superficie total de una unidad de masa de partículas

$$A_w = \frac{6x_1}{\Phi_s \rho_p \bar{D}_{p1}} + \frac{6x_2}{\Phi_s \rho_p \bar{D}_{p2}} + \dots + \frac{6x_n}{\Phi_s \rho_p \bar{D}_{pn}}$$
$$= \frac{6}{\Phi_s \rho_p} \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{\bar{D}_{pi}}$$

donde los subíndices = incrementos individuales

x_i = fracción de masa en un determinado incremento

n = número de incrementos

$\bar{D}_{pi}$ = diámetro promedio de las partículas, tomado como media aritmética de los diámetros mayor y menor en el incremento

Tamaño promedio de las partículas

Diámetro medio volumen-superficie D_s , que está relacionado con el área de la superficie específica A_w

$$\overline{D}_s \equiv \frac{6}{\Phi_s A_w \rho_p}$$

Número de partículas en la mezcla

Para una forma dada de partículas, el volumen de una partícula cualquiera es proporcional a su “diámetro” elevado al cubo:

$$v_p = aD_p^3$$

Donde a es el factor de forma de volumen

$$N_w = \frac{1}{a\rho_p} \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{\overline{D}_{pi}^3} = \frac{1}{a\rho_p \overline{D}_V^3}$$

Problema

El análisis por tamizado que se presenta en la tabla 1 corresponde a una muestra de cuarzo triturado. La densidad de las partículas es 2.650 kg/m^3 (0.00265 g/mm^3), y los factores de forma son $a = 2$ y $\Phi_s = 0.571$. Para el material con tamaño de partículas comprendido entre 4 y 200 mallas, calcule:

- a) A_w : superficie específica (mm^2/g)
 N_w : en (número partículas /gramo)
- b) D_v : diámetro medio de volumen en (mm)
- c) D_s : diámetro medio volumen-superficie (mm)
- d) D_w : diámetro medio de masa en (mm)
- e) N_i : para el incremento 150/200 mallas en ($n^\circ \text{ part./gramo}$)
- f) f) ¿Qué fracción del número total de partículas hay en el incremento de 150/200 mallas?

Tabla Análisis de partículas por tamizado

MacCabe Smith Operaciones básicas

Mallas	Abertura del tamiz <i>Dpi, mm</i>	Fracción de masa retenida <i>xi</i>	Diámetro medio en el incremento <i>Dpi, mm</i>	Fracción masa acumulada <i>inferior a Dpi</i>
4	4.699	0.0000	—	1.0000
6	3.327	0.0251	4.013	0.9749
8	2.362	0.1250	2.845	0.8499
10	1.651	0.3207	2.007	0.5292
14	1.168	0.2570	1.409	0.2722
20	0.833	0.1590	1.001	0.1132
28	0.589	0.0538	0.711	0.0594
35	0.417	0.0210	0.503	0.0384
48	0.295	0.0102	0.356	0.0282
65	0.208	0.0077	0.252	0.0205
100	0.147	0.0058	0.178	0.0147
150	0.104	0.0041	0.126	0.0106
200	0.074	0.0031	0.089	0.0075
Pan	—	0.0075	0.037	0.0000

Solución

Con el fin de obtener **A_w** uso la:

$$A_w = \frac{6x_1}{\Phi_s \rho_p \bar{D}_{p1}} + \frac{6x_2}{\Phi_s \rho_p \bar{D}_{p2}} + \dots + \frac{6x_n}{\Phi_s \rho_p \bar{D}_{pn}}$$

y para **N_w** la (ec. 28.11):

$$N_w = \frac{1}{a \rho_p} \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{\bar{D}_{pi}^3} = \frac{1}{a \rho_p \bar{D}_V^3}$$

Solución Con el fin de obtener A_w y N_w , la ecuación (28.4) se expresa como

$$A_w = \frac{6}{0.571 \times 0.00265} \sum \frac{x_i}{\bar{D}_{pi}} 3\,965 \sum \frac{x_i}{\bar{D}_{pi}}$$

y la ecuación (28.11) como

$$N_w = \frac{1}{2 \times 0.00265} \sum \frac{x_i}{\bar{D}_{pi}^3} = 471.7 \sum \frac{x_i}{\bar{D}_{pi}^3}$$

a) Para el incremento 4/6 mallas $\bar{D}_{pi}$ es la media aritmética de las aberturas de mallas de los tamices correspondientes, o sea, a partir de la tabla 28.1 $(4.699 + 3.327)/2 = 4.013$ mm. Para este incremento $x_i = 0.0251$; por lo tanto $x_i/\bar{D}_{pi}$ es $0.0251/4.013 = 0.0063$ y $x_i/\bar{D}_{pi}^3$ es 0.0004 . Se calculan las correspondientes cantidades para los otros 11 incrementos y se suman para obtener $\sum x_i/\bar{D}_{pi} = 0.8284$ y $\sum x_i/\bar{D}_{pi}^3 = 8.8296$. Puesto que se excluye la fracción recogida sobre el contenedor, la superficie específica y el número de partículas por unidad de masa de las partículas de 200 mallas o mayores se obtiene dividiendo los resultados de las ecuaciones (28.4) y (28.11) por $1 - x_1$ (puesto que $i = 1$ para la tapadera), o sea, $1 - 0.0075 = 0.9925$. Por lo tanto,

$$A_w = \frac{3\,965 \times 0.8284}{0.9925} = 3\,309 \text{ mm}^2/\text{g}$$

$$N_w = \frac{471.7 \times 8.8296}{0.9925} = 4.196 \text{ partículas/g}$$

Dividiendo el volumen total de la muestra entre el número de partículas de la mezcla (véase más adelante) se obtiene el volumen promedio de una partícula. El diámetro de dicha partícula es el *diámetro medio de volumen* $\bar{D}_V$ que se obtiene a partir de la relación

$$\bar{D}_V = \left[\frac{1}{\sum_{i=1}^n (x_i / \bar{D}_{pi}^3)} \right]^{1/3} \quad (28.9)$$

b) De la ecuación (28.9),

$$\bar{D}_V = \frac{1}{8.8296^{1/3}} = 0.4838 \text{ mm}$$

c) El diámetro medio volumen-superficie se halla a partir de la ecuación (28.6):

$$\bar{D}_s = \frac{1}{\sum_{i=1}^n (x_i / \bar{D}_{pi})}$$

$$\bar{D}_s = \frac{1}{0.8284} = 1.207 \text{ mm}$$

d) El diámetro medio másico $\bar{D}_w$ se obtiene a partir de la ecuación (28.8). Por esto, con base en los datos de la tabla 28.1,

$$\sum x_i \bar{D}_{pi} = \bar{D}_w = 1.677 \text{ mm}$$

e) El número de partículas en el rango de malla 150/200 (28.11):

$$N_w = \frac{1}{a\rho_p} \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{\bar{D}_{pi}^3} = \frac{1}{a\rho_p \bar{D}_V^3}$$

$$\begin{aligned} N_1 &= \frac{x_2}{a\rho_p \bar{D}_{p2}^3} = \frac{0.0031}{0.8 \times 0.00265 \times 0.089^3} \\ &= 2074 \text{ partículas/g} \end{aligned}$$

Esto es $2074/4,196 = 0.494$ o 49.4% de las partículas en los 12 rangos superiores. Para el material en la fracción del platillo, el número de partículas y el área superficial específica son enormemente más grandes que para el material más burdo, pero no se pueden estimar con exactitud a partir de los datos de la tabla 28.1.

Medida del tamaño de partículas finas

El **tamizado en seco** es útil para la medida de part. con diám. $> 44 \mu\text{m}$ (325 mallas)

*El **análisis de tamizado húmedo** se utiliza para diámetros $< 10 \mu\text{m}$. Las partículas aún más finas se miden por diversos métodos:*

*El **microscopio** óptico*

La **sedimentación** por gravedad se utilizan con partículas de 1 a $100 \mu\text{m}$ de diámetro, como es el contador Coulter, un aparato que mide los cambios en la resistividad de un electrólito, a medida que éste lleva las partículas una por una a través de un pequeño orificio.

Las técnicas de: **dispersión de luz, sedimentación en centrífugas o ultracentrífugas, espectroscopia de correlación de fotones y microscopía electrónica** son útiles con partículas aún más finas.

PROPIEDADES DE MASAS DE PARTÍCULAS

La presión no es la misma en todas las direcciones.

En general, una presión que se aplica en una dirección crea cierta presión en otras direcciones, pero siempre es menor que la presión aplicada.

Es mínima en la dirección de ángulos rectos con respecto a la presión aplicada.

En una masa homogénea, la relación entre:

$$(\text{Presión normal} / \text{Presión aplicada}) = P_L / P_V = K'$$

es característica del material.

- La densidad de la masa puede variar, dependiendo del grado de empaque de los granos.
- La densidad de un fluido es $f(T, P)$
- La densidad de cada partícula sólida es $f(T, P)$
- La densidad global es mínima cuando la masa está “floja”.
- La densidad global es máxima cuando la masa se somete a una vibración o apisonamiento.

- Antes de que una masa de partículas empacadas de forma apretada pueda fluir, se debe aumentar en volumen a fin de permitir el entrecruzamiento de granos para moverlas entre sí. Sin tal dilatación el flujo es imposible.

Cuando los sólidos granulares están apilados sobre una superficie plana, los lados de la pila están a un ángulo reproducible definido con la horizontal.

α_r se llama ángulo de reposo del material.

Para sólidos granulares que fluyen libremente, $\alpha_r = 15-30^\circ$

Propiedades del flujo de partículas:

Cohesivos: no fluyen $K' = 0$

*No cohesivos: fluyen desde depósitos
a silos $K' = 0,35-0,6$*



REDUCCION DE TAMAÑO

Todas las formas en las que las partículas de sólidos se pueden cortar o romper en piezas más pequeñas. Durante los procesos industriales, la reducción de tamaño de sólidos se lleva a cabo por diferentes métodos y con distintos fines.

Maneras de reducir el tamaño

- Compresión: Cascanueces
- Impacto: Martillo
- Frotación o abrasión: lima
- Corte: tijera

El costo de energía es más alto en la trituración y la molienda, así que son importantes los factores que controlan este costo. Durante la reducción de tamaño, las partículas del material de alimentación de sólidos primero son distorsionadas y tensionadas.

Eficiencia

La reducción de tamaño es una de las operaciones unitarias menos eficientes desde el punto de vista energético. Menos de 1% de la energía liberada de los sólidos se utiliza para crear superficies nuevas; el resto se disipa como calor. En las máquinas en operación, la energía debe ser suministrada también para sobrepasar la fricción en el soporte y otras partes móviles. La eficiencia mecánica, la relación entre la energía liberada de los sólidos a la entrada de energía total a la máquina, está en el intervalo de 25 a 60%.

Leyes de trituración

El trabajo requerido para formar partículas de tamaño D_p a partir de alimentaciones muy grandes es proporcional a la raíz cuadrada de la relación de la superficie al volumen del producto S_p / U_p .

$$\frac{P}{\dot{m}} = \frac{K_b}{\sqrt{D_p}}$$

Donde K_b es una constante que depende del tipo de máquina y del material a triturar.

Índices de trabajo

Un índice de trabajo W_i se define como el requerimiento total de energía en kilowatt-horas por tonelada.

$$\frac{P}{\dot{m}} = 0.3162 W_i \left(\frac{1}{\sqrt{D_{pb}}} - \frac{1}{\sqrt{D_{pa}}} \right)$$

Si 80% de la alimentación pasa una malla de tamaño de D_{pa} mm y 80% del producto una malla de D_{pb} mm.

Si D_p está en milímetros, P en kilowatts y $\dot{m}$ en toneladas por hora.

EJEMPLO

¿Cuál es la potencia requerida para triturar 100 ton/h de piedra caliza si 80% de la alimentación pasa por un tamiz de 2 in. y 80% del producto por un tamiz de 1/8 in.?

Solución:

A partir de la tabla 2, el índice de trabajo para la piedra caliza es 12.74.

Tabla 2

Índices de trabajo para trituración seca[†] o molienda húmeda[‡]

Material	Gravedad específica	Índice de trabajo W_i
Bauxita	2.20	8.78
Residuo de cemento	3.15	13.45
Materias primas de cemento	2.67	10.51
Arcilla	2.51	6.30
Carbón	1.4	13.00
Coque	1.31	15.13
Granito	2.66	15.13
Grava	2.66	16.06
Roca de yeso	2.69	6.73
Mineral de hierro (hematita)	3.53	12.84
Piedra caliza	2.66	12.74
Roca fosfórica	2.74	9.92
Cuarzo	2.65	13.57
Esquisto	2.63	15.87
Pizarra	2.57	14.30
Roca volcánica	2.87	19.32

[†] Para molienda seca multiplicar por $\frac{4}{3}$.

[‡] Tomado con autorización de Allis-Chalmers, Solids Processing Equipment Div., Appleton, Wisconsin.

$$\dot{m} = 100 \text{ ton/h}$$

$$D_{pa} = 2 \times 25.4 = 50.8 \text{ mm} \quad D_{pb} = 0.125 \times 25.4 = 3.175 \text{ mm}$$

La potencia requerida es

$$P = 100 \times 0.3162 \times 12.74 \left(\frac{1}{\sqrt{3.175}} - \frac{1}{\sqrt{50.8}} \right) \\ = 169.6 \text{ kW (227 hp)}$$

Equipo para la reducción de tamaño

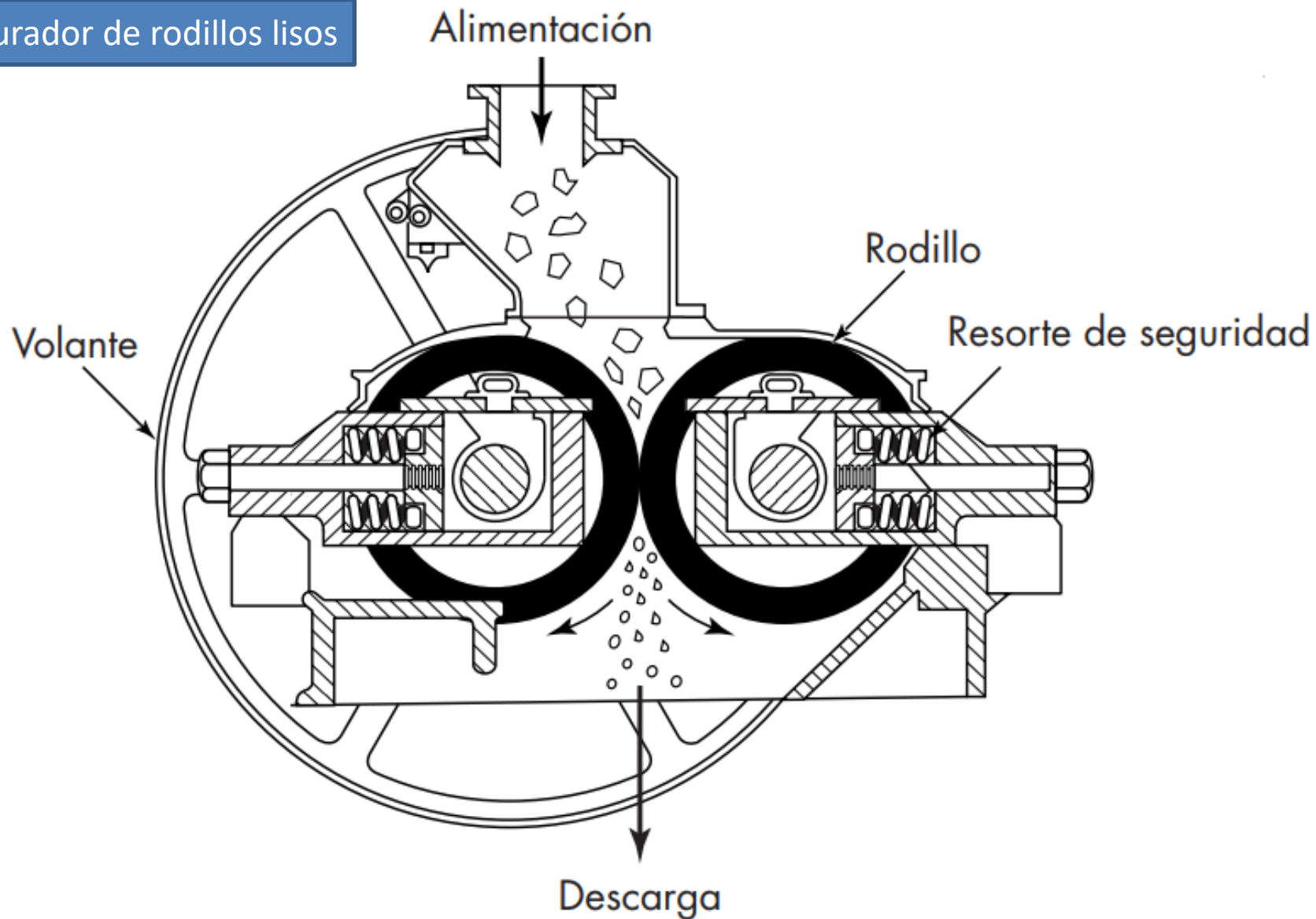
El equipo para reducción de tamaño se divide en trituradores, molinos, molinos de ultra finos y máquinas de corte.

EQUIPO	MEDIDA	MATERIAL OBTENIDO
Trituradores	150-250 mm	Pedazos
Trituradores secundarios	6 mm	Pedazos pequeños
Molinos	40 a 200 mallas (74 μ m)	Polvo
Molinos ultrafinos	1 - 50 μ m	Polvo
Cortadoras	2 - 10 mm	Partículas de formas y tamaños definidos

Trituradores

Los trituradores son máquinas de baja velocidad para la reducción burda de grandes cantidades de sólidos. Los principales tipos son los trituradores de mandíbulas, los trituradores giratorios, los trituradores de rodillos lisos y los trituradores de rodillos dentados. Los primeros tres trabajan por compresión y pueden quebrar piezas grandes de materiales muy duros, como en las reducciones primaria y secundaria de rocas y minerales metálicos.

Triturador de rodillos lisos



Molinos

El producto procedente de un triturador con frecuencia se introduce como alimentación de un molino, en el que se reduce a polvo. Los molinos comerciales descritos en esta sección son molinos de martillos e impactores, máquinas de rodadura-compresión, molinos de frotación y molinos de volteo.

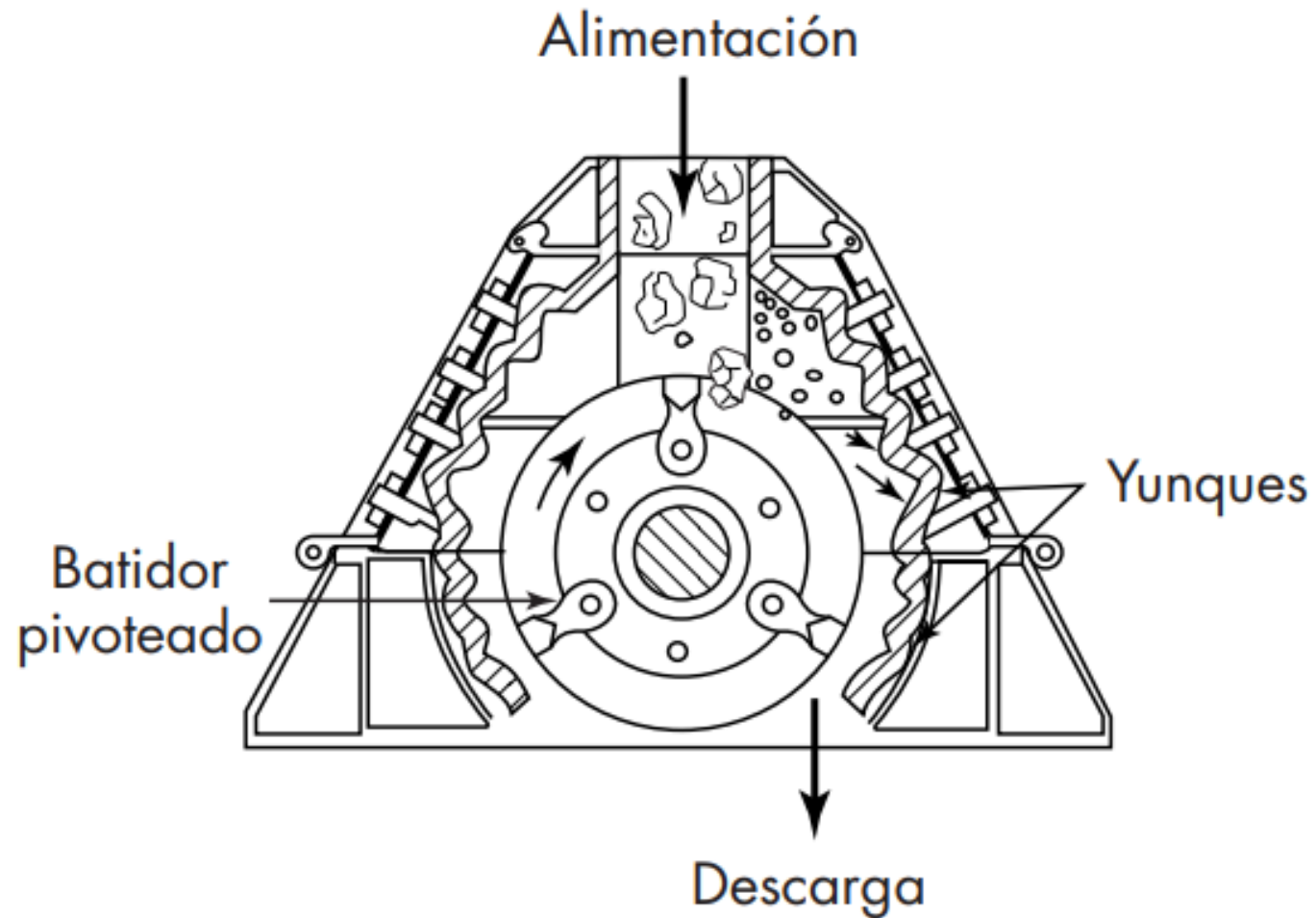
Molinos de martillos e impactores.

Forman un producto con un tamaño de partículas de 25 mm (1 in.) a 20 mallas. En los molinos de martillo para una molienda fina, la velocidad periférica de los extremos de los martillos alcanza 110 m/s (360 ft/s); estas máquinas reducen de 0.1 a 15 toneladas/h a tamaños más finos que 200 mallas.

Los molinos comerciales típicamente reducen de 60 a 240 kg del sólido por kilowatt hora (100 a 400 lb/hp h) de energía consumida.

Los impactores son con frecuencia máquinas de reducción primaria para rocas y minerales, tratando hasta 600 tons/h.

Impactor

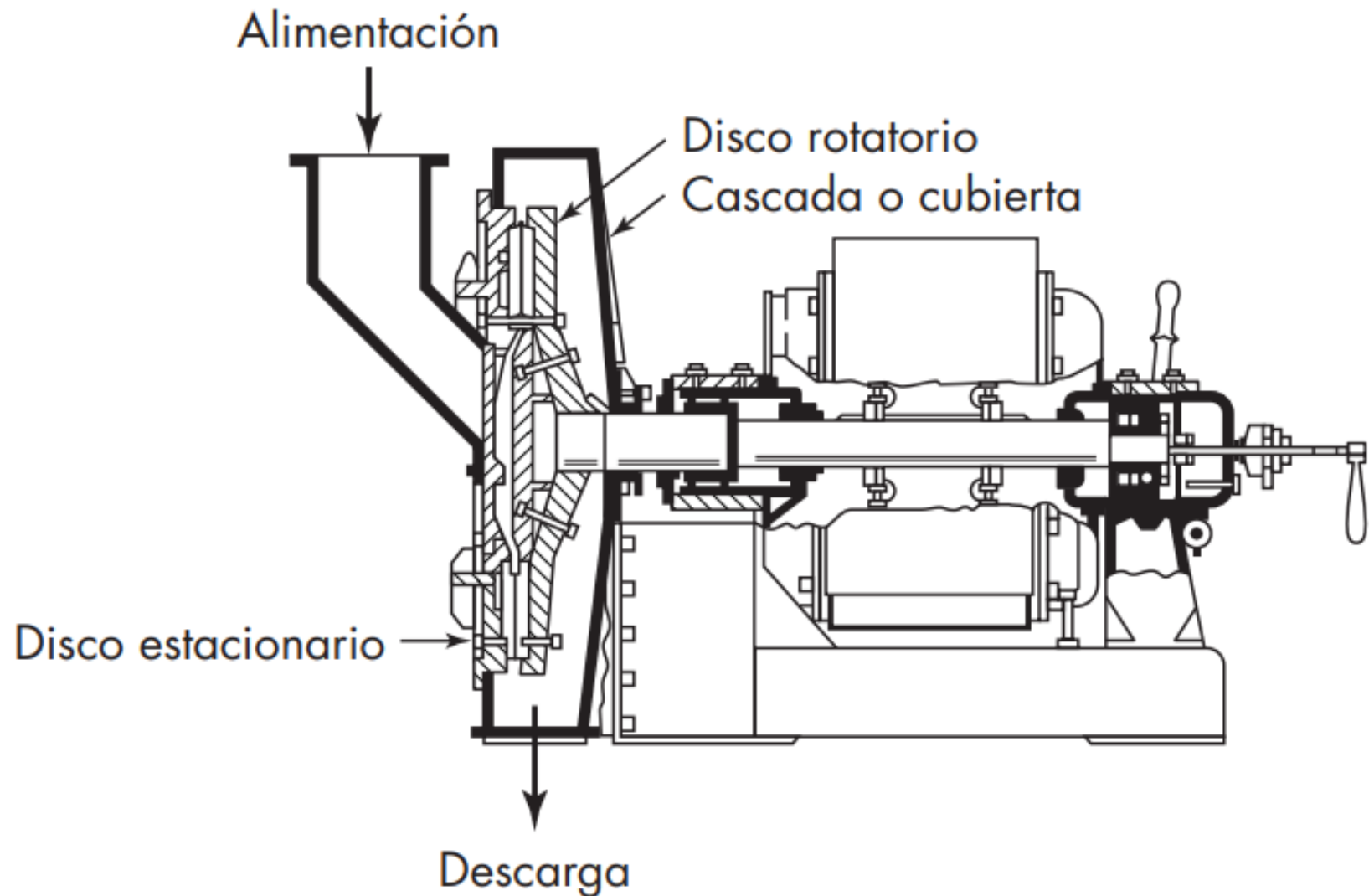


Molinos de atrición (desgaste).

Los discos de los molinos de rotación simple tienen de 250 a 1 400 mm (10 a 54 in.) de diámetro, y giran de 350 a 700 rpm. Los discos de los molinos de rotación doble giran más rápido, de 1 200 a 7 000 rpm. La alimentación se tritura hasta un tamaño máximo de partícula del orden de 12 mm (1/2 in.) y debe entrar con una velocidad uniforme controlada.

Los molinos de frotación muelen desde 1/2– hasta 8 tons/h para dar productos que pasan a través de un tamiz de 200 mallas. La energía requerida depende en gran medida de la naturaleza de la alimentación y del grado de reducción alcanzado, y es mucho mayor que en los molinos y trituradores descritos anteriormente. Los valores típicos están comprendidos entre 8 y 80 kWh (10 y 100 hp · h) por tonelada de producto.

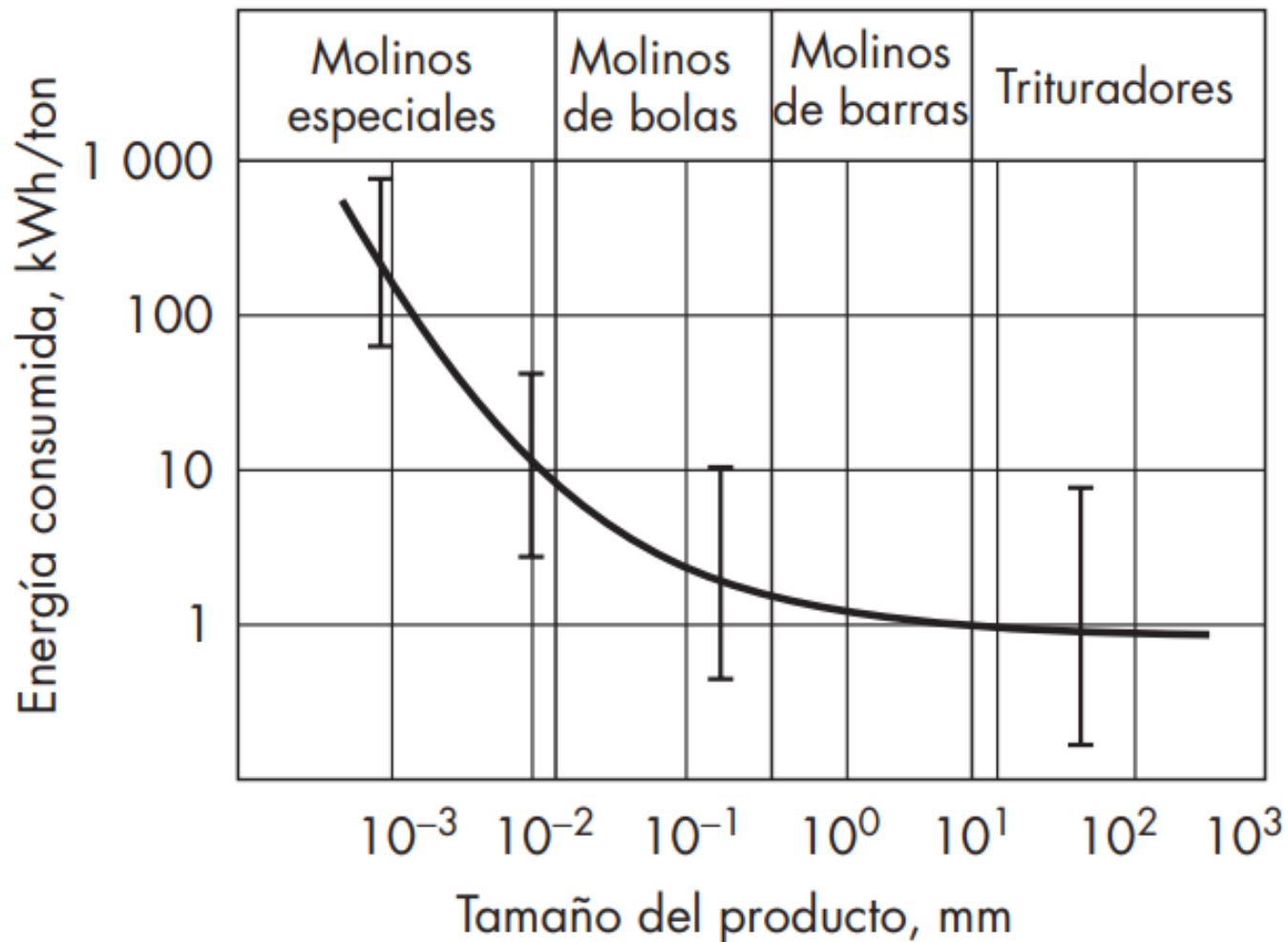
Molino de frotación o atrición



Consumo de energía.

La reducción de tamaño es probablemente la más ineficiente de todas las operaciones unitarias: arriba de 99% de la energía va a la operación del equipo, produciendo calor y ruido indeseables, dejando menos de 1% para la creación de una superficie nueva.

Consumo de energía en función del tamaño del producto en un equipo de reducción de tamaño



Reducción de tamaño de alimentos



REDUCCIÓN DE TAMAÑO DE SÓLIDOS

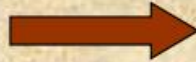
Existen muy diversas razones por las que es conveniente reducir el tamaño de los alimentos sólidos en la Industria Alimentaria:

Mejora la palatabilidad e incrementa los usos del producto



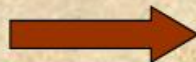
Frutas y Verduras: enteras sin piel, rebanadas, troceadas, pulpas, jugos
Granos de cereales: producción de productos derivados de ellos (harinas, sémolas, almidones)

Facilita la extracción de constituyentes



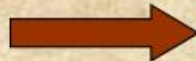
- Extracción de jugo o pulpa
- Extracción de azúcar, café
- Extracción de aceites

Aumenta la relación superficie/volumen del sólido



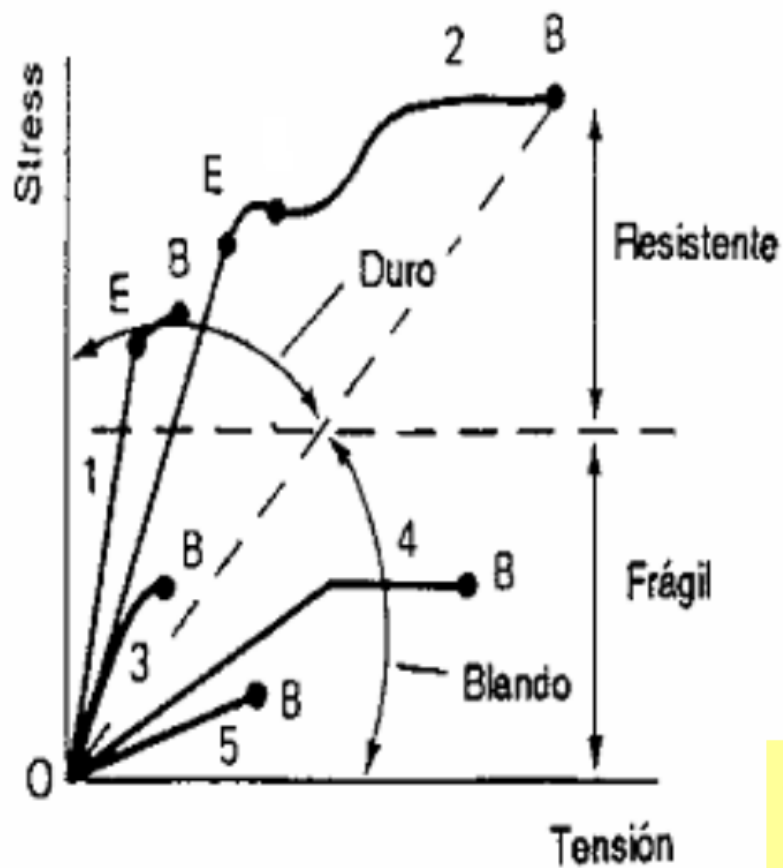
aumenta la vel. de transferencia de calor y masa, lo que permite optimizar y controlar operaciones como: deshidratación, congelación, tratamiento térmico, escaldado, horneado, fritura, lixiviación, etc

Permite mezclas íntimas y homogéneas



- Masas de panificación
- Mezclas de productos

Diagrama de Stress-Tensión correspondiente a diversos alimentos



E = Límite de elasticidad

B = Punto de rotura

OE = Región elástica

Alimento 1 ⇒ duro, resistente y quebradizo

Alimento 2 ⇒ duro, muy resistente y dúctil

Alimento 3 ⇒ duro, frágil y quebradizo

Alimento 4 ⇒ blando, frágil y dúctil

Alimento 5 ⇒ blando, frágil y quebradizo



Compresión

Se utiliza para reducir sólidos duros a tamaños mas o menos grandes



Impacto

Se utiliza para reducir sólidos a tamaños gruesos, medianos y finos



Frotación o Cizalla

Se utiliza para producir partículas finas



Corte

Se utiliza para obtener tamaños y formas definidos o eliminar partes del sólido

El tipo de fuerza a emplear (corte, compresión, impacto o cizalla) para lograr una reducción de tamaño depende del tipo de alimento que se tenga

TIPOS DE ALIMENTOS

TIPO DE FUERZA QUE REQUIEREN PARA REDUCIR SU TAMAÑO



Cristalinos



Fuerza de compresión



Fibrosos



Fuerza de corte, así como una combinación de fuerzas de impacto y cizalla

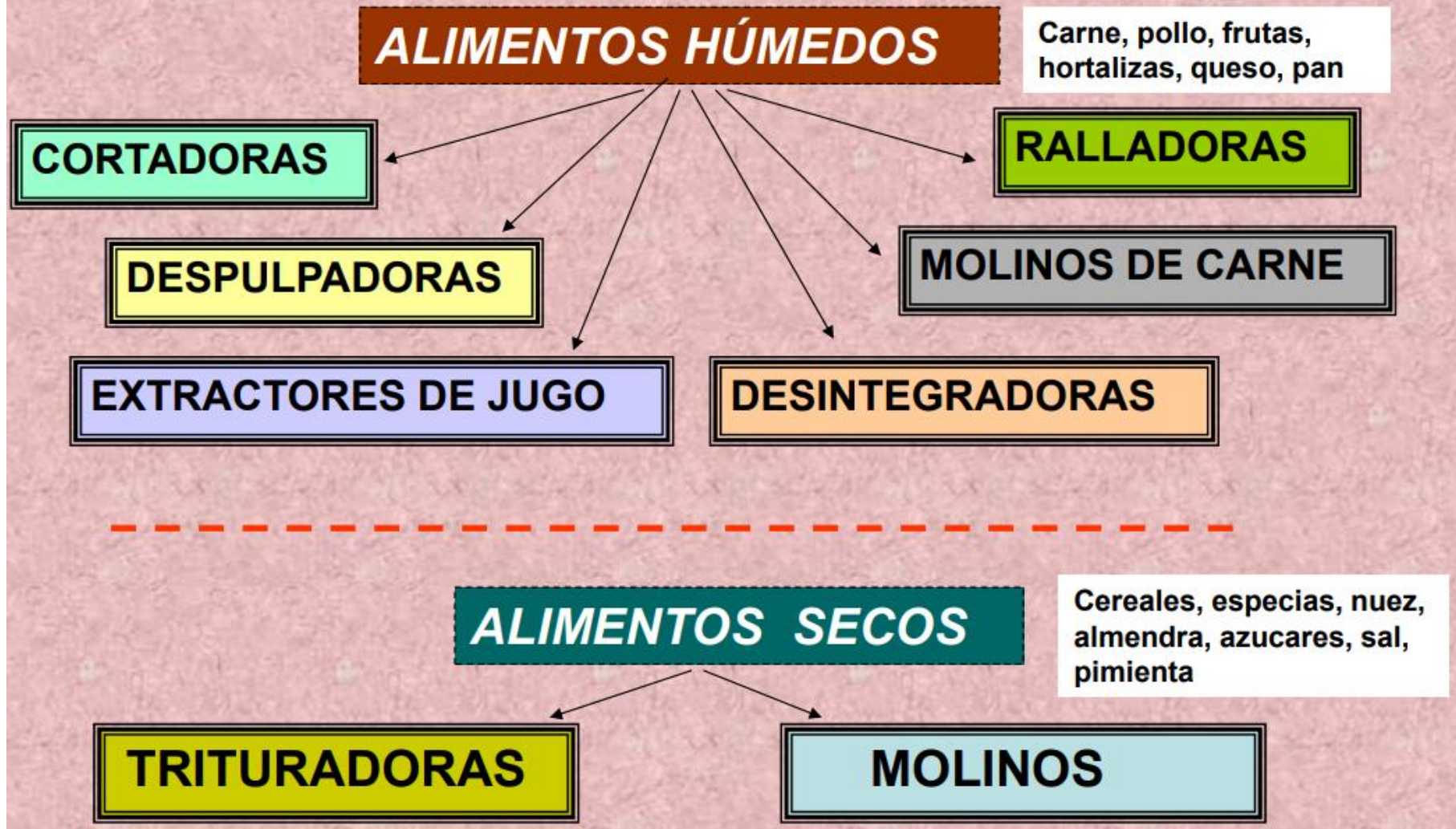


Blandos



Fuerza de cizalla

EQUIPO PARA LA REDUCCIÓN DE TAMAÑO DE SÓLIDOS



Tipo de Molino	Fuerza aplicada	Productos en los que se emplea
De Bolas	Impacto y Cizalla	Harina de pescado, Colorantes
De Martillos	Impacto	Verduras deshidratadas, Especias, Pimienta, Maíz
De Rodillos lisos	Compresión	Refinado de chocolate, Molienda de café
De Rodillos Estriados	Compresión y Cizalla	Caña de azúcar, Trigo, Cebada
Discos	Cizalla	Maíz, Trigo, Pimienta, Cacao, Nuez moscada, Clavo
Discos y clavos	Cizalla e Impacto	Alginatos, Paprika, Lactosa

El tipo de fuerza a emplear (corte, compresión, impacto o cizalla**) para lograr una reducción de tamaño depende del tipo de alimento que se tenga**

Para seleccionar un equipo de trituración o molienda; siempre será necesario definir las características de los productos de partida y finales a fin de diseñar el equipo ideal para determinado proceso

Entre las características de los alimentos de importancia en la Reducción de Tamaño se encuentran:



Dureza y Abrasividad



Sensibilidad térmica



Temperaturas de ablandamiento y fusión (Untuosidad)



Contenido de humedad

Cristalización

- **Cristalización es la formación de partículas sólidas a partir de una base homogénea.**
- La formación de partículas sólidas puede tener lugar a partir de un vapor, como la nieve, mediante la solidificación de un líquido fundido, como ocurre en la formación de grandes monocristales, o bien como cristalización de una solución líquida.

- En la cristalización industrial de una solución, la mezcla bifásica formada por los líquidos madres y los cristales de todos los tamaños, contenida en un cristalizador y que se saca como producto, recibe el nombre de *magma*.

- **En la práctica**, la mayor parte del líquido madre es separado de los cristales por filtración o centrifugación, y el balance se elimina por lavado con solvente fresco.
- Las efectividades de estos pasos de purificación dependen del tamaño y uniformidad de los cristales

- Si los cristales van a ser posteriormente procesados, por **filtración, lavado, reacción** con otros productos químicos, **transporte y almacenamiento**, es deseable que su **tamaño sea adecuado y uniforme**

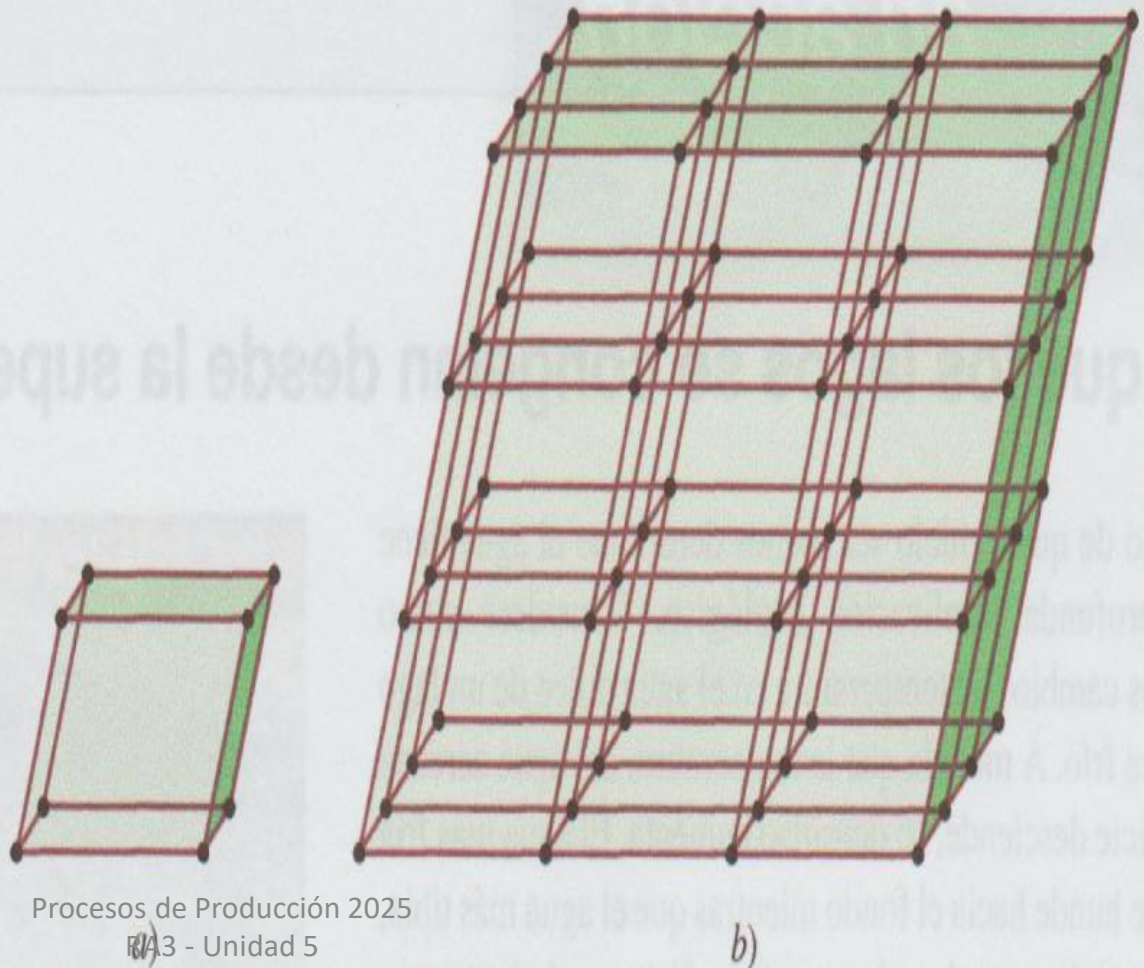
GEOMETRÍA DE LOS CRISTALES

Un cristal es el tipo de materia no viva más altamente organizada.

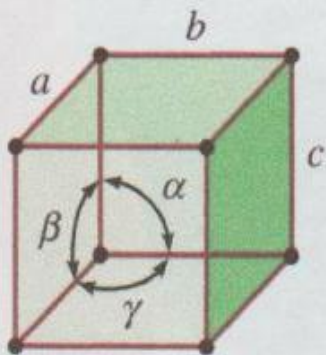
Se caracteriza por el hecho de que sus partículas constituyentes, que pueden ser átomos, moléculas o iones, están dispuestas en formaciones ordenadas de forma tridimensional llamadas **redes espaciales**.

Celda unitaria

Figura 11.14 a) Una celda unitaria y b) su extensión en tres dimensiones. Las esferas negras representan átomos o moléculas.



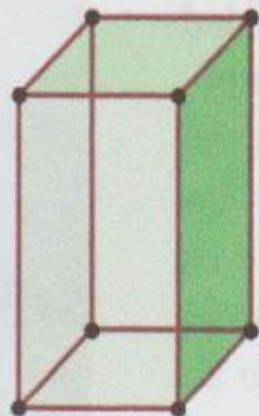
- Las 7 clases son:
cúbico, hexagonal, trigonal, tetragonal, ortorrómbico, monoclínico y triclínico.
- Un determinado material puede cristalizar en dos o más sistemas diferentes dependiendo de las condiciones de cristalización.
- Ej.: **carbonato de calcio** se presenta con más frecuencia en la naturaleza en la forma **hexagonal** (como calcita), pero también existe en la forma **ortorrómbica** (aragonita).



Cúbica simple

$$a = b = c$$

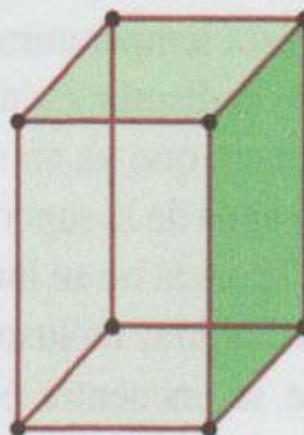
$$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$$



Tetragonal

$$a = b \neq c$$

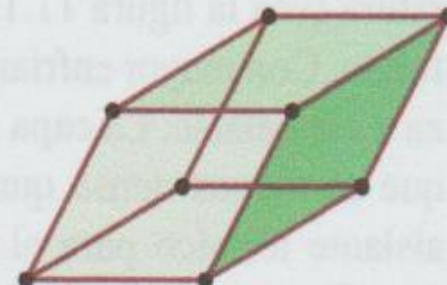
$$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$$



Ortorrómbica

$$a \neq b \neq c$$

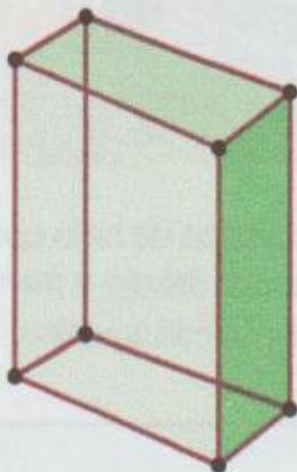
$$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$$



Romboédrica

$$a = b = c$$

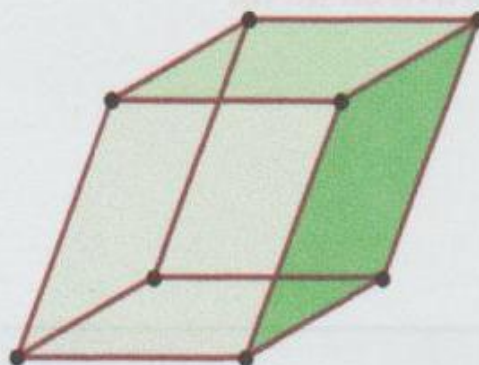
$$\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$$



Monoclínica

$$a \neq b \neq c$$

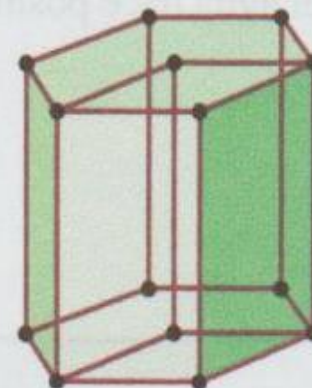
$$\gamma \neq \alpha = \beta = 90^\circ$$



Triclínica

$$a \neq b \neq c$$

$$\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$$



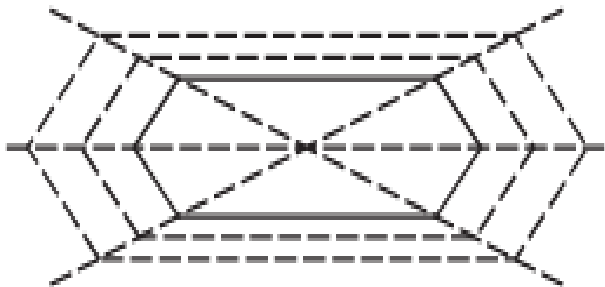
Hexagonal

$$a = b \neq c$$

$$\alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$$

- En condiciones ideales, un cristal en crecimiento, mantiene la semejanza geométrica durante el crecimiento.

Tal cristal recibe el nombre de ***invariante***.



$$L = 6 u_p / S_p$$

L longitud característica

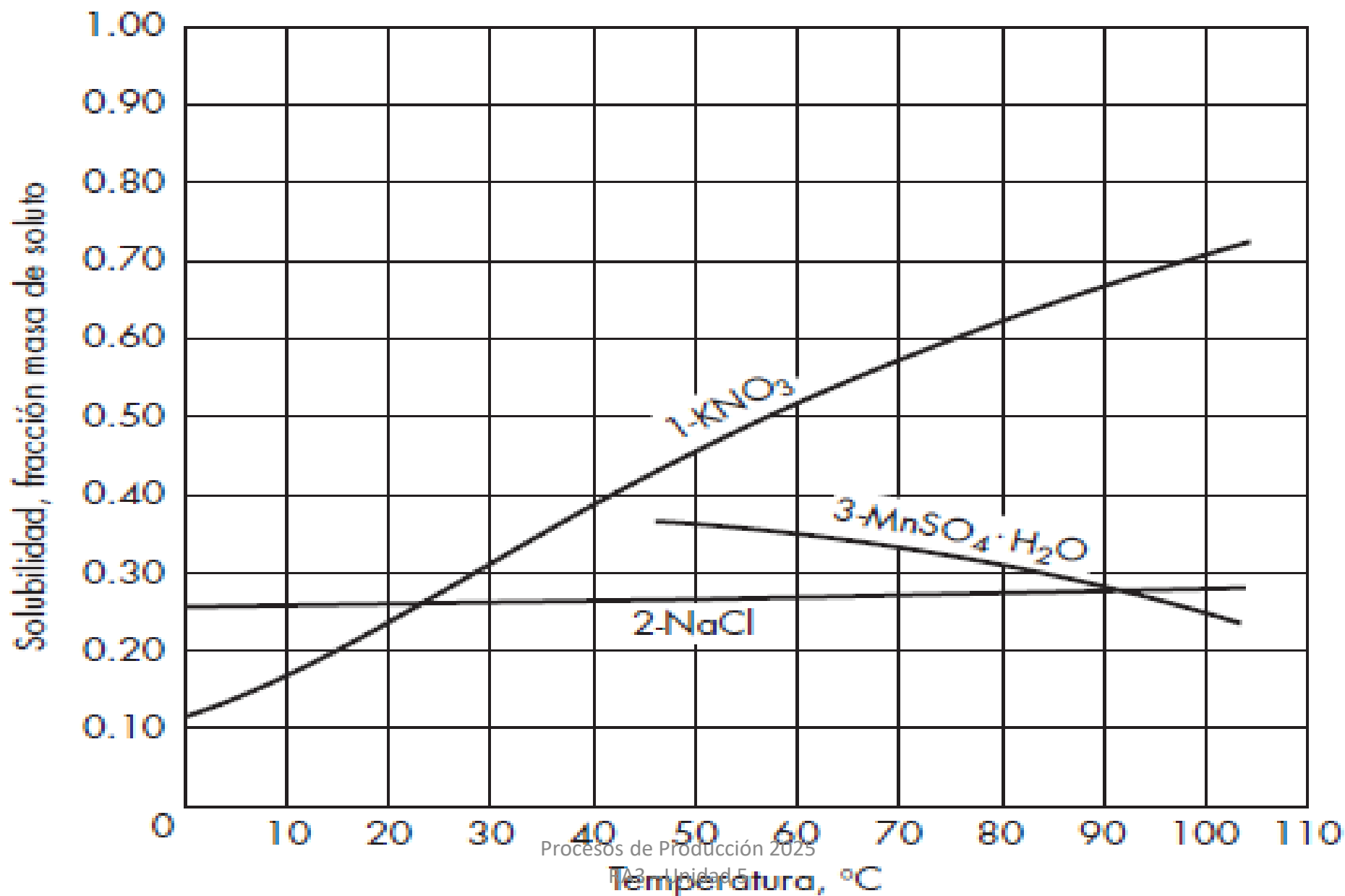
u_p volumen total del cristal

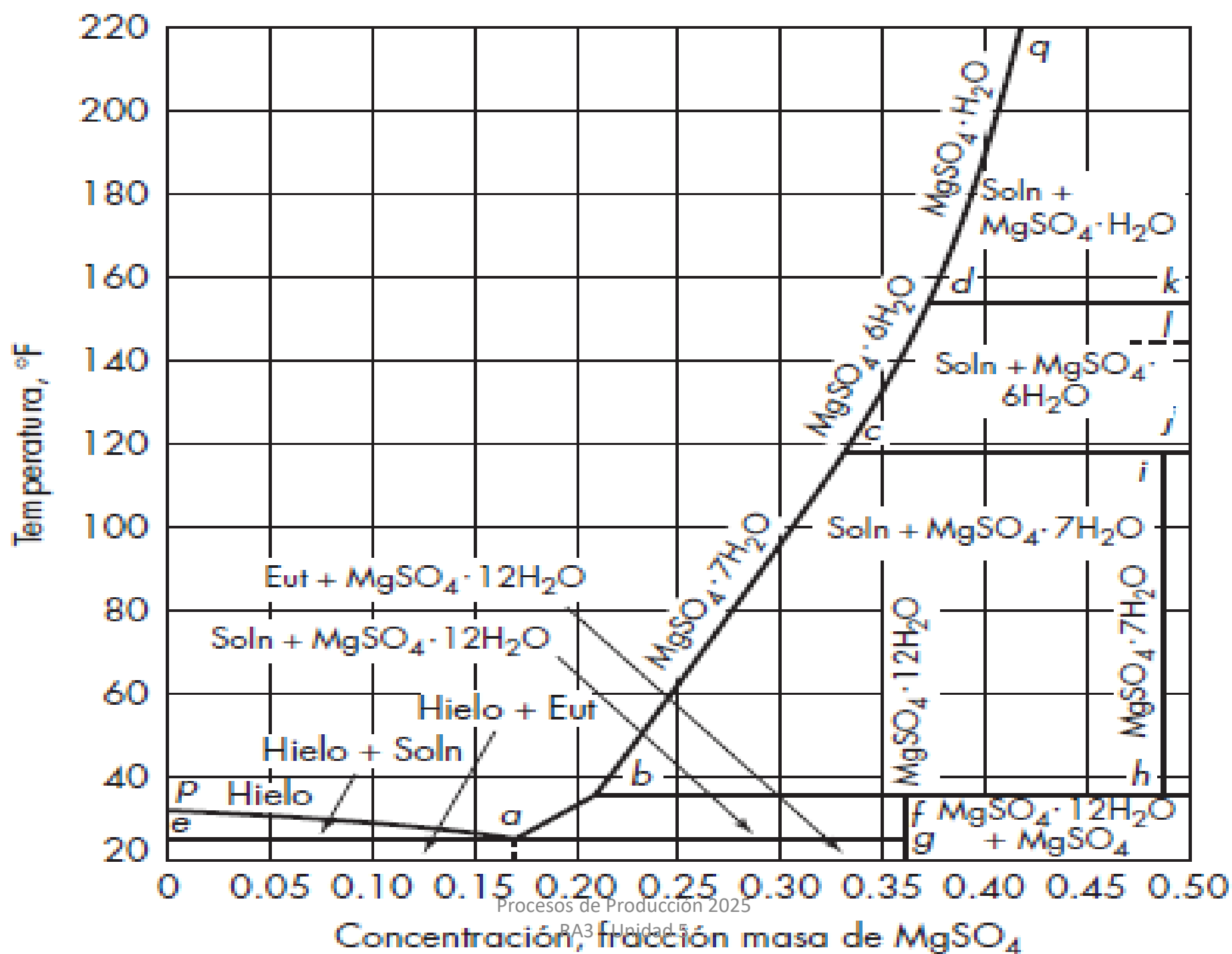
S_p superficie total del cristal

Válido para sólidos regulares $\Phi_s = 1$

No válido para discos y agujas $\Phi_s = 0$

EQUILIBRIOS: Curvas de solubilidad





Rendimiento

- En muchos **procesos industriales de cristalización**, los cristales y los líquidos madres están en contacto suficiente tiempo para alcanzar el equilibrio y los líquidos madres están saturados a la temperatura final del proceso.
- El rendimiento del proceso se calcula entonces a partir de la concentración de la solución original y la solubilidad para la temperatura final.

Si durante el proceso se produce una evaporación apreciable, ésta debe conocerse o estimarse.

Ejemplo

- Una solución consistente en 30% de MgSO_4 y 70% de H_2O se enfría hasta 60°F .

Durante el enfriamiento se evapora 5 % del agua total del sistema.

¿Cuántos kg de cristales se obtendrán por 1.000 kg de mezcla original?

A partir de la figura se observa que los cristales son **$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$** y la conc. del líquido madre es 24,5 % de **MgSO_4 anhidro** y 75.5% de H_2O .

$$\text{PM MgSO}_4 = 120,4$$

$$\text{PM MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} = 246,5$$

- Por cada 1000 kg de solución original hay:
Agua total (libre y ligada) = $0,70 \cdot 1000 = 700 \text{ kg agua total}$
Se evaporan: $0,05 \cdot 700 = 35 \text{ kg agua}$
 $\text{kg MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} = 1000 \cdot 0,30 (246,5/120,4) = 614 \text{ kg MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$
Agua libre: $1000 - 35 - 614 = 351 \text{ kg agua}$.
- **Rendimiento:** en 100 kg de líquido madre hay
 $24,5 (246,5/120,4) = 50,16 \text{ kg de MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$
y $100 - 50,16 = 49,84 \text{ kg de agua libre}$.
- En 1000 kg de solución original el $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ en líq.madre =
 $(50,16/49,84)351 = 353 \text{ kg MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$.
La cosecha final es $614 - 353 = 261 \text{ kg MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$.

Sobresaturación

- **formación de un cristal** requiere de 2 etapas:
 - 1) el nacimiento de una nueva partícula, y
 - 2) su crecimiento hasta tamaño macroscópico.

La primera etapa: ***nucleación***.

Como generar sobresaturación

- Si la solubilidad del soluto aumenta muy fuerte con el incremento de la temperatura, como ocurre en el caso de muchas sales inorgánicas, una solución saturada se transforma en sobresaturada por simple enfriamiento y reducción de la temp.
- Si la solubilidad es relativamente independiente de la temperatura, como en el caso de la sal común, una solución sobresaturada se puede generar por evaporación de una parte del solvente.
- Si la solubilidad es muy elevada ,no es deseable ni enfriamiento ni evaporación, la sobresaturación se genera mediante la adición de un tercer componente. El tercer componente puede actuar físicamente mediante la formación, con el solvente original, de una mezcla de solventes en la que la solubilidad de soluto se reduce de manera brusca. Este proceso se llama **salinación**.
- Si se requiere una precipitación casi completa, se puede crear un nuevo soluto de manera química añadiendo un tercer componente que reacciona con el soluto original y forma una sustancia insoluble. Este proceso se llama **precipitación**.

$$\Delta y = y - y_s$$

$$\Delta c = c - c_s$$

donde

Δy = sobresaturación, fracción mol del soluto

y = fracción mol del soluto en la solución

y_s = fracción mol del soluto en la solución saturada

Δc = sobresaturación molar, moles/volumen

c = conc. molar de soluto en la solución

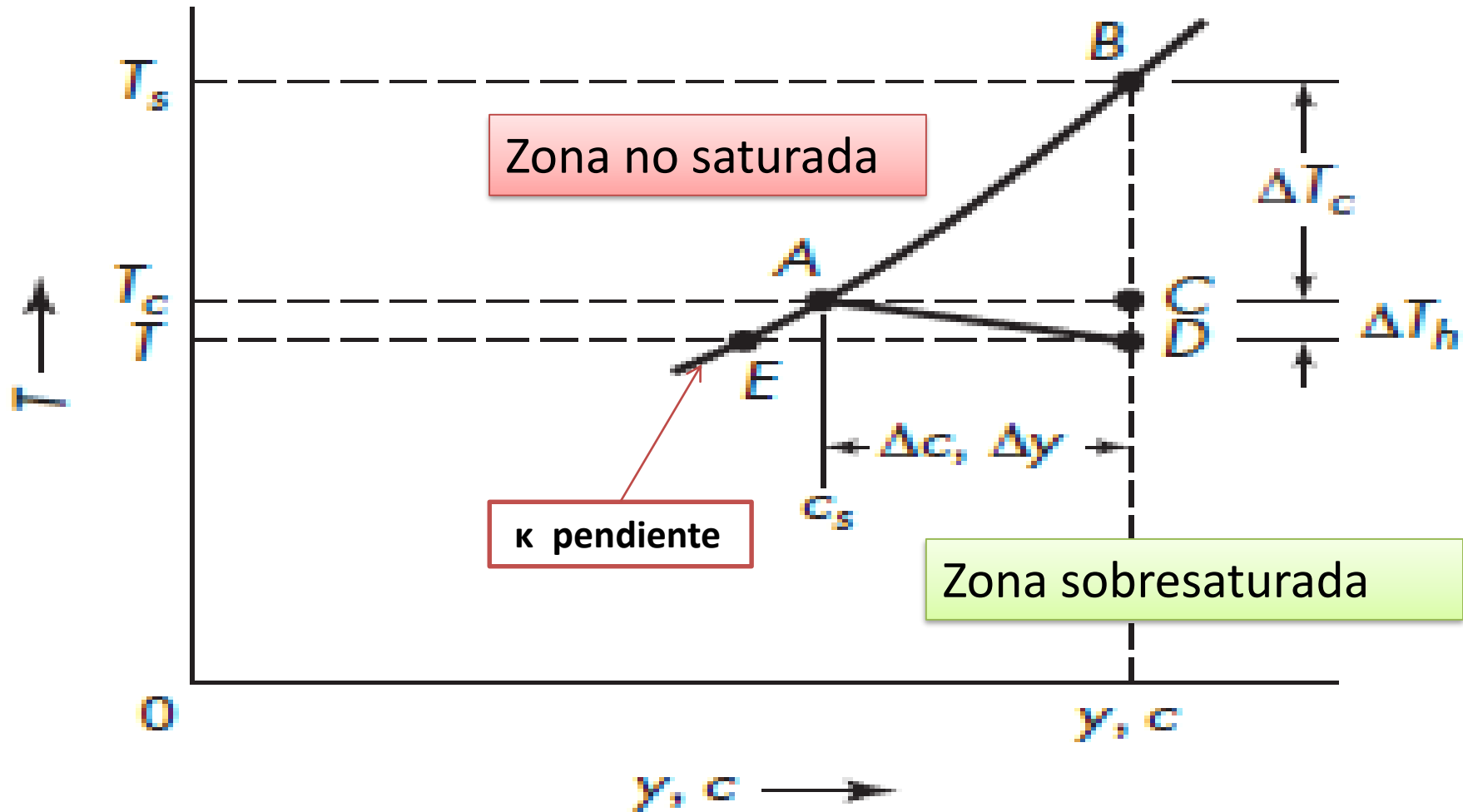
c_s = conc. molar de soluto en la solución saturada

ρ = densidad molar de la solución

$$\Delta c = \rho_m c - \rho_s c_s = \rho_m \Delta y$$

relación de conc. $\alpha = c/c_s = 1 + \Delta c/c_s = y/y_s = 1 + \Delta y/y_s$

La diferencia de temperatura como un potencial = ΔT_h



- $$\Delta T_h = T_s - T_c = \kappa (y - y_s) = \kappa (\Delta y) = \kappa \Delta c / \rho_m$$

Nucleación

- La **velocidad de nucleación** es el número de nuevas partículas formadas por unidad de tiempo y unidad de volumen de magma o de líquidos madres exentos de sólidos.
- Clasifican en tres grupos:
 - nucleación espúrea,
 - nucleación primaria y
 - nucleación secundaria.

nucleación espúrea

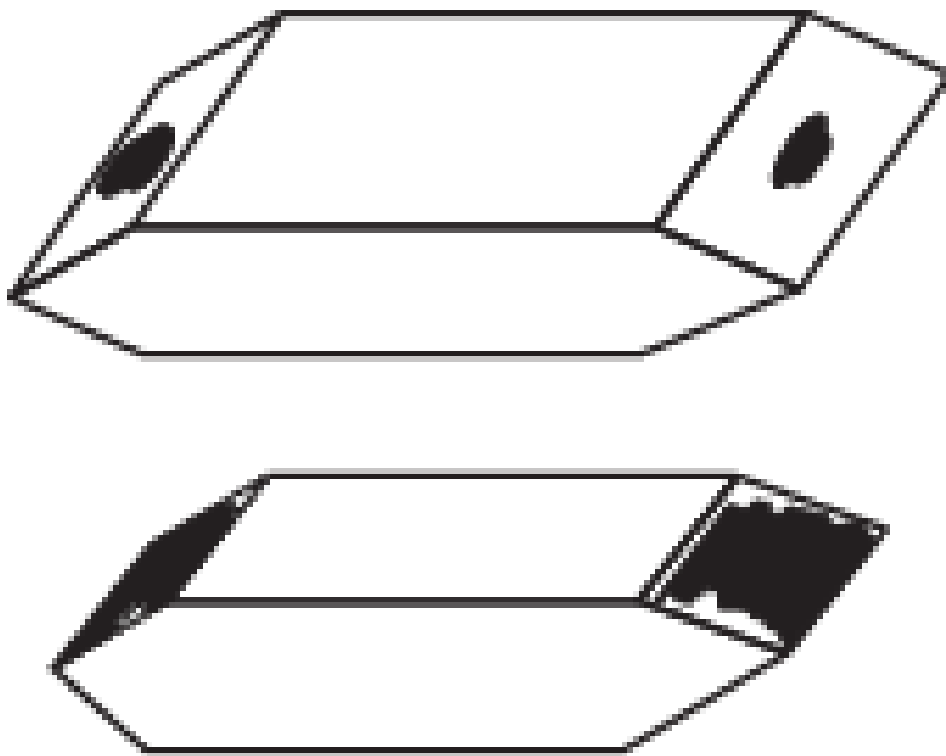
- **nucleación espúrea** ocurre para grandes sobresaturaciones o cuando la circulación del magma es deficiente. Se caracteriza por crecimientos anormales en forma de agujas o escobillas desde los extremos de los cristales que, en estas condiciones, pueden crecer mucho más rápido que las caras o lados.
- Las espigas son cristales imperfectos que están unidos al cristal principal por fuerzas débiles y que se separan para dar cristales de mala calidad. Este fenómeno recibe el nombre de:
- *crianza acicular (formación de aguja).*
- *crecimiento velado, en sobresaturaciones moderadas*
crec.cristal muy rapido y atrapa soluciones

crianza acicular (formación de aguja).



Crecimiento acicular
 $\Delta T > 8\text{ }^{\circ}\text{C}$

crecimiento velado, en sobresaturaciones moderadas
crecimiento cristal muy rápido y atrapa soluc.madre



Crecimiento velado
 $4 < \Delta T < 8 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Nucleación primaria

- **nucleación** se refiere al nacimiento de cuerpos muy pequeños en el interior de una fase homogénea sobresaturada



Crecimiento bueno
 $\Delta T < 4\text{ }^{\circ}\text{C}$

Efecto de la sobresaturación sobre el crecimiento de los cristales y el tipo de nucleación para $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$.

TEMPERATURA, °C Saturación, T_s	CRECIMIENTO	NUCLEACIÓN	
		Ausencia de contacto cristal-sólido	Presencia de contacto cristal-sólido
$T_s - 1$	CRECIMIENTO BUENO	NO NUCLEACIÓN	Región de mejor operación
$T_s - 4$	CRECIMIENTO VELADO		
$T_s - 8$	CRECIMIENTO DENDRÍTICO ACICULAR EN ESCOBA		ASTILLADO Y TRITURACIÓN DE CRISTALES QUE COLISIONAN
$T_s - 16$		NUCLEACIÓN HETEROGÉNEA	

Nucleación primaria

- ***nucleación homogénea**, que está restringida a la formación* de nuevas partículas dentro de una fase no influenciada en absoluto por ningún tipo de sólidos, incluyendo las paredes del recipiente y también las partículas submicroscópicas de sustancias extrañas.
- **Nucleación heterogénea** cuando partículas sólidas de sustancias extrañas influyen sobre el proceso de nucleación catalizando un aumento de la velocidad de nucleación para una sobresaturación determinada o dando una velocidad finita en una sobresaturación donde la nucleación homogénea sólo ocurrirá después de un tiempo dilatado.

Nucleación homogénea

- Ocurre en algunas reacciones de **precipitación**

CLUSTER → EMBRION → NUCLEO → CRISTAL

- las partículas se asocian en número suficiente para formar un ***embrión***, *en el que existen los comienzos* de una disposición reticular, así como la formación de una fase nueva y separada
- ***núcleo***, *que es la menor agrupación de partículas que no se redisuelve* y que, por lo tanto, crece para formar un cristal

- **Equilibrio**
- Un cristal pequeño puede estar en equilibrio con una solución sobresaturada. Este equilibrio es inestable debido a que si en la solución está presente un cristal grande, el cristal más pequeño se disolverá y el cristal grande crecerá hasta que desaparezca el cristal pequeño.
- Este fenómeno recibe el nombre de ***maduración de Ostwald.***

Ecuación de Kelvin

Relaciona: solubilidad sustancia – tamaño partícula (ec.27.8)

$$\ln \alpha = \frac{4V_M \sigma}{vRTL}$$

Donde:

L = tamaño del cristal

α = relación de concentraciones de soluciones sobresaturadas y saturadas

V_m = volumen molar del cristal

σ = tensión promedio en la superficie de contacto entre sólido y líquido

v = (n° de iones/molécula de soluto), para cristales moleculares $v = 1$)

Puesto que $\alpha = 1 + s$, la ecuación (27.8) indica que un cristal de tamaño muy pequeño L puede existir en equilibrio con una solución que tiene una sobresaturación s con respecto a una solución saturada en equilibrio con cristales grandes.

Velocidad de nucleación

$$B^\circ = C \exp \left[- \frac{16\pi\sigma^3 V_M^2 N_a}{3v^2 (RT)^3 (\ln \alpha)^2} \right] \quad (27.9)$$

donde

B° = velocidad de nucleación ($n^\circ/\text{cm}^3.\text{s}$)

$N_a = 6,022.1023$ (moléculas/gmol)

R = constante de los gases, $8.3143 \cdot 10^7$ ergs/gmol . K

C = factor de frecuencia. Por analogía con la nucleación de gotas de agua a partir de vapor de agua sobresaturado, es del orden de 10^{25} núcleos/ $\text{cm}^3.\text{s}$

σ = de 80 a 100 ergs/ cm^2 para sales comunes

En las reacciones de precipitación, donde y_s es muy pequeño y se pueden generar relaciones de sobresaturación de manera rápida, es probable que ocurra **nucleación homogénea**.

Nucleación heterogénea

$$B^{\circ} = 10^{25} \exp \left[-\frac{16\pi V_M^2 N_a \sigma_a^3}{3(RT)^3 v^2 s^2} \right] \quad (27.10)$$

PROBLEMA

Suponiendo que la velocidad de nucleación heterogénea del cloruro de potasio es consistente con una tensión aparente en la superficie de contacto de 2.5 ergs/cm², determine la velocidad de nucleación en función de s a una temperatura de 80 °F (300 °K).

SOLUCION

Se utiliza la ecuación (27.10). El peso molecular del KCl es 74.56. La densidad del cristal es 1.988 g/cm³. Puesto que el KCl se disocia en iones K⁺ y Cl⁻, $\nu = 2$.

Por lo tanto: $V_M = 74,56 / 1,988 = 37,51 \text{ (cm}^3\text{/gmol)}$ $\sigma_a = 2,5 \text{ (ergs/cm}^2\text{)}$

El exponente de la ecuación (27.10) es

$$\frac{16\pi(37.51)^2 \times 6.0222 \times 10^{23} \times 2.5^3}{3(300 \times 8.3134 \times 10^7)^3 (2^2 s^2)} = \frac{0.03575}{s^2}$$

Para $B^\circ = 1$, el valor de s viene dado por

$$1 = 10^{25} e^{-0.03575/s^2} = e^{57.565} e^{-0.03575/s^2}$$
$$\frac{0.03575}{s^2} = 57.565 \quad s = \sqrt{\frac{0.03575}{57.565}} = 0.02492$$

A partir de la ecuación

$$B^\circ = e^{57.565} e^{-0.03575/s^2}$$

es posible calcular el valor de B° para valores de s del orden de 0.025. Los resultados se presentan en la tabla 27.1. El aumento explosivo de B° a medida que s aumenta es aparente.

- **Nucleación secundaria**

La formación de núcleos atribuible a la influencia de los cristales macroscópicos que existen en el magma recibe el nombre de *nucleación secundaria*.

Se conocen dos tipos, uno de ellos atribuible al **esfuerzo cortante del fluido** y el otro a las **colisiones entre los cristales existentes** o bien de los **cristales con las paredes** del cristalizador y los rodetes (impulsores) giratorios o con las palas de agitadores.

Nucleación de contacto

- En el equipo comercial de cristalización, la nucleación resulta a partir de la nucleación homogénea y la nucleación de contacto. La velocidad global B° puede escribirse como

$$B^\circ = B_{ss} + B_e + B_c \quad (27.11)$$

Donde:

B_{ss} = *velocidad de la nucleación homogénea debida a la fuerza impulsora de sobresaturación*

B_e = *velocidad de nucleación a partir del contacto de los cristales con el impulsor*

B_c = *velocidad de nucleación a partir del contacto cristal-cristal*

EQUIPO DE CRISTALIZACIÓN

Tres **métodos para producir sobresaturación**: f (curva de solubilidad del soluto).

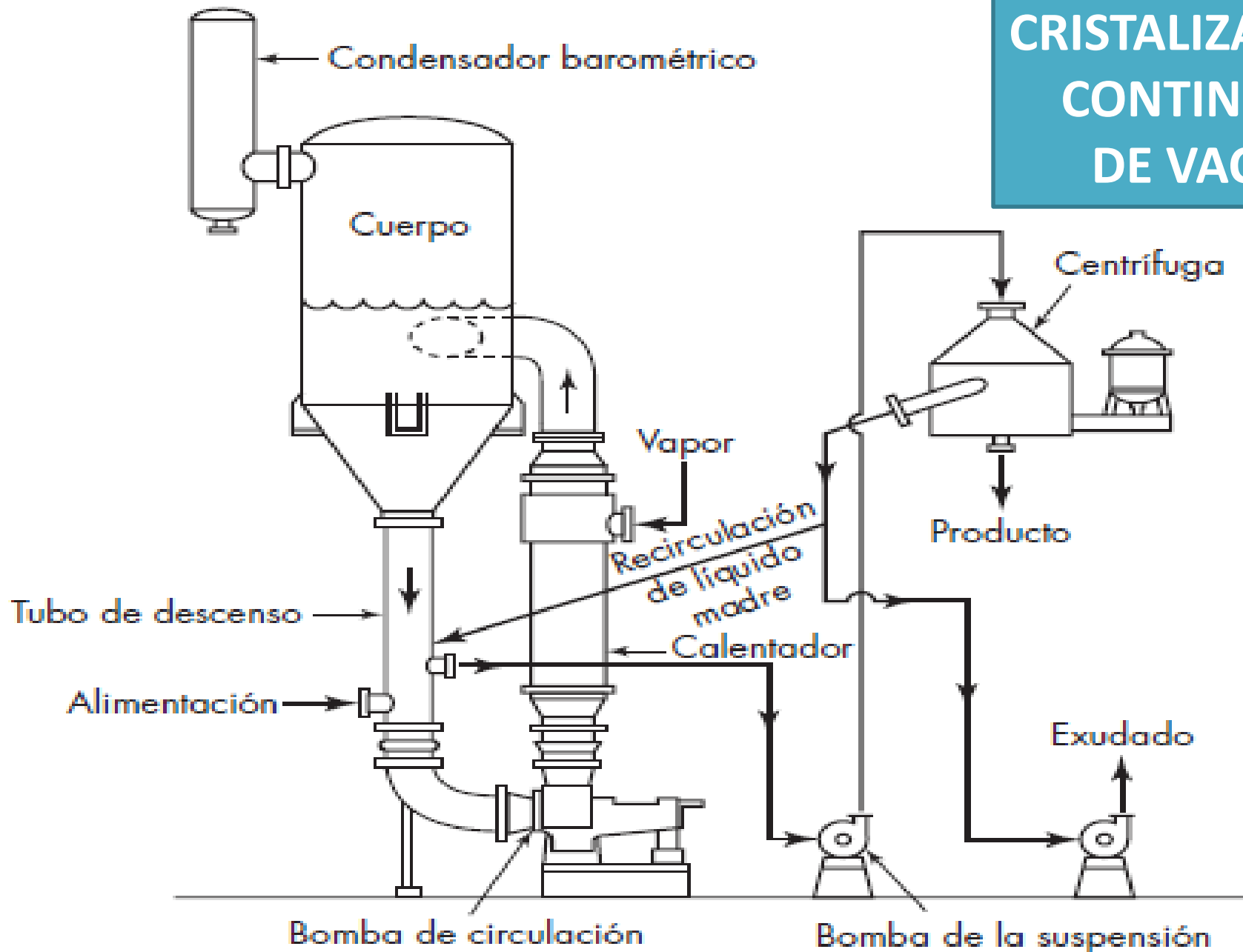
1) Solutos como el nitrato de potasio y el sulfito de sodio **son mucho menos solubles a temperaturas bajas que a temperaturas elevadas**, de forma que la sobresaturación se puede conseguir simplemente **por enfriamiento**.

2) Cuando **la solubilidad es casi independiente de la temperatura**, como ocurre en el caso de la sal común, o bien **cuando disminuye al aumentar la temperatura**, la sobresaturación se genera **por evaporación**.

3) En los casos intermedios resulta eficaz una combinación de **evaporación y enfriamiento**.

Por ejemplo: el nitrato de sodio puede cristalizarse con satisfacción enfriando sin evaporar, evaporando sin enfriar o bien mediante una combinación de enfriamiento y evaporación.

CRISTALIZADOR CONTINUO DE VACIO



Una disolución saturada que contiene 1500 kg de ClK a 360 °K se enfría en un depósito ab a 290 °K. Si la densidad relativa de la disolución es 1,2 y la solubilidad del ClK es de 53,55 100 partes de agua a 360 °K y de 34,5 a 290 °K. Calcúlese:

- a) La capacidad del tanque requerida.
- b) El peso de cristales obtenidos, despreciándose las pérdidas de agua por evaporación.

Solución:

Suponiendo datos de solubilidad en peso, a 360 °K se disolverán 1500 kg de ClK
 $1500 \times 100/53,55 = 2801$ kg de agua.

Masa total a la disolución: $1500 + 2801 = 4301$ kg.

Densidad de la disolución: $1,2 \cdot 10^3 = 1200$ kg/m³.

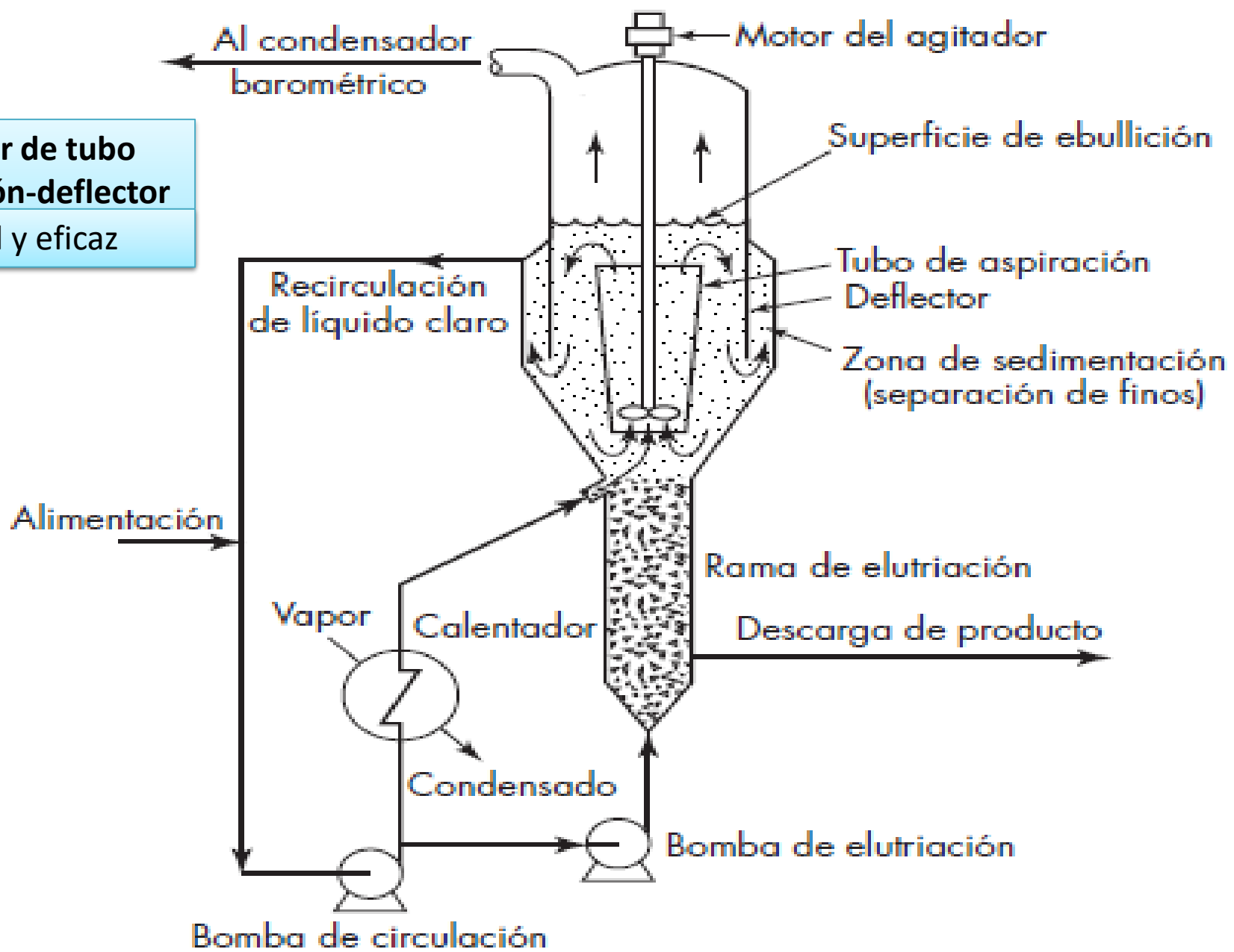
Capacidad del tanque: $\frac{4301 \text{ kg}}{1200 \text{ kg/m}^3} = 3,58 \text{ m}^3$.

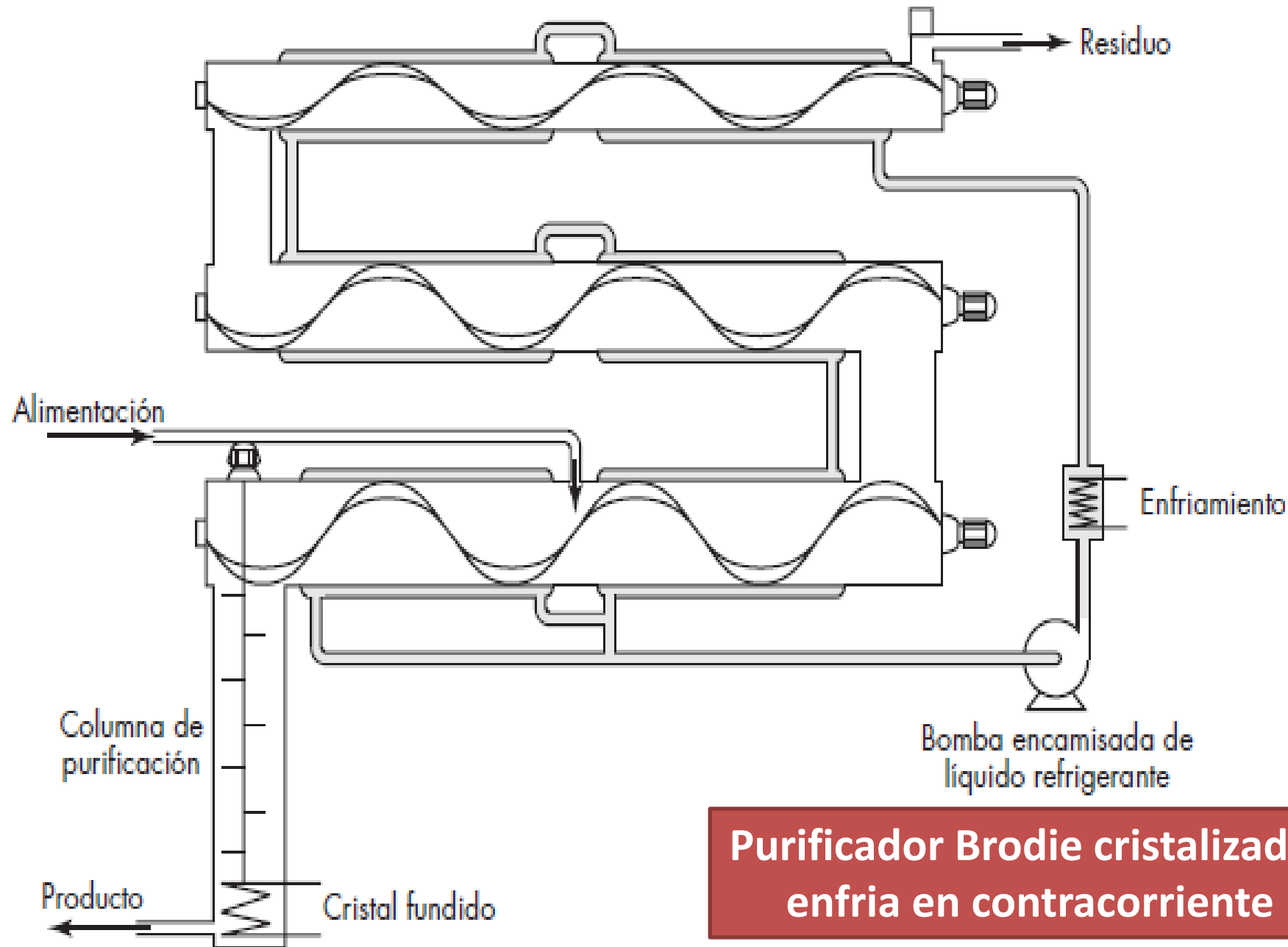
A 290 °K, la masa de ClK disuelta en 2801 kg m³ agua:

$$\frac{2801}{100} \cdot 34,5 = 966 \text{ kg}$$

Por consiguiente, la masa de cristales obtenida de la solución: $1500 - 966 = 534$ kg.

Cristalizador de tubo de aspiración-deflector
Mas versátil y eficaz





Purificador Brodie cristizador enfria en contracorriente

Rendimiento de un proceso de cristalización.

10 000 kg de una disolución salina que tiene 30% en peso de CO_3Na_2 , se enfría a 293 °K (20 °C).

La sal cristaliza como decahidrato.

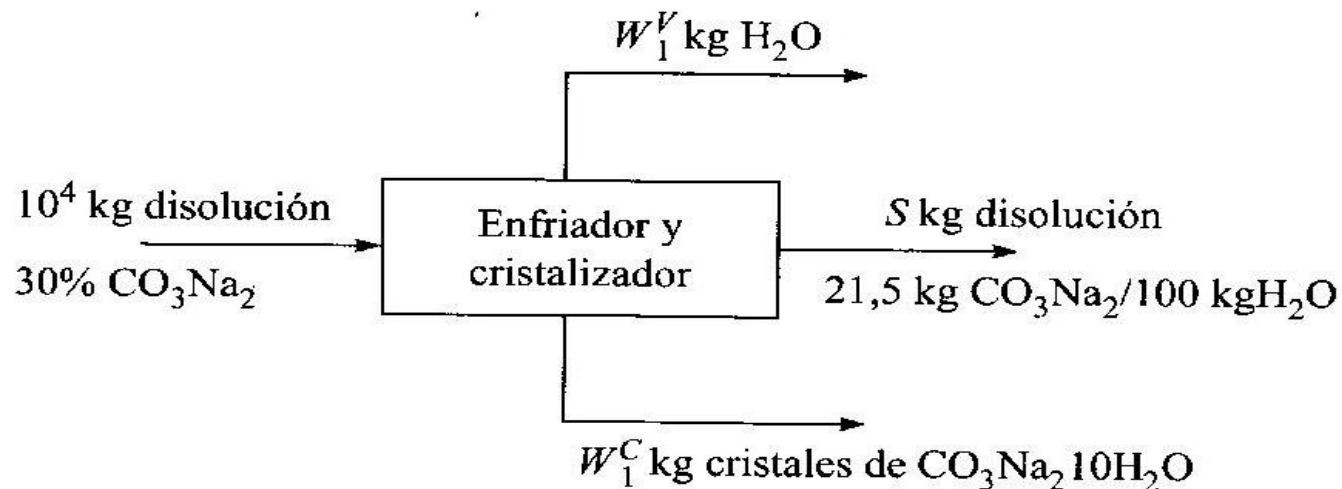
¿Cuál será la cantidad de cristales de $\text{CO}_3\text{Na}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$, si la solubilidad es 21,5 kg de CO_3Na_2 anhidro/100 kg de agua total?

Procédase a los cálculos para los siguientes casos:

- Supóngase que no se evapora agua.
- Supóngase que el 3% del peso total de la disolución se pierde por evaporación del durante el enfriamiento.

Datos y notas:

- Pesos moleculares: CO_3Na_2 : 106,0; $10\text{H}_2\text{O}$: 180,2 y $\text{CO}_3\text{Na}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$: 286,2.
- Diagrama de flujo para el proceso de cristalización:



Solución:

Efectuando un balance de materia para el agua, suponiendo nula evaporación: $W_1^V = 0$:

$$(0,70)(10^4) = \frac{100}{100 + 21,5} S + \frac{W_1^C}{286,2} 180,2 + 0$$

Nota:

$\frac{180,2}{286,2}$ fracción en peso del agua en los cristales.

Análogamente un balance de materia para el CO_3Na_2 :

$$(0,30)(10^4) = \frac{21,5}{100 + 21,5} S + \frac{W_1^C}{286,2} 106,0 + 0$$

Resolviendo (1) y (2): $W_1^C = 6370$ kg de $\text{CO}_3\text{Na}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$; y $S = 3630$ kg de solución

Para el apartado b): $W_1^V = (0,03)(10\,000) = 300$ kg H_2O .

Balance de materia para el agua:

$$(0,70)(10^4) = \frac{100}{100 + 21,5} S + \frac{W_1^C}{286,2} 180,2 + 300$$

Resolviendo (2) y (3): $W_1^C = 6630$ kg de cristales de $\text{CO}_3\text{Na}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$; y $S = 3070$ kg solución.

Bibliografía

- Operaciones unitarias en ingeniería química – Warren N. McCabe – Séptima edición.