

CENTRIFUGAÇÃO

Esta operação unitária tem por objetivo separar partículas que não são facilmente separadas por decantação que em alguns casos é muito lenta. O processo encontra aplicação na área de alimentos em indústrias de laticínios, cervejaria, no processamento de óleo vegetal, concentração de proteína de pescado, processamento de suco, remoção de material celular e na separação de emulsões em seus constituintes.

A operação de centrifugação é também utilizada nas operações de extração líquido-líquido e sólido-líquido em processos biotecnológicos e na indústria farmacêutica.

As principais aplicações de centrífugas na indústria de laticínios incluem:

- **Desnate e Padronização do Leite:** remoção e ajuste do teor de gordura presente no leite.
- **Clarificação de Leite e Soro:** remoção de sujidades, em geral, presentes no leite e no soro.
- **Degerminação:** remoção de microrganismos do leite reduzindo-se a contagem global padrão, quantidade de esporos aeróbicos, anaeróbicos, psicotróficos, etc.
- **Concentração do Creme:** ajuste do teor de gordura do creme adequando-o para as mais variadas aplicações

Em processos de produção ou recuperação de:

- **Caseína:** recuperação de caseína para aplicação em produtos na forma de caseinato.
- **Finos de Queijo:** recuperação de finos de queijo para seu reaproveitamento.
- **Petit Suisse:** fabricação do quark por meio de centrífugas e resfriadores.
- **Queijos Frescos:** fabricação de queijo fresco cremoso - *cream cheese*.
- **Butteroil:** por meio de centrífugas, óleo de manteiga pode ser obtido a partir do creme do leite ou da própria manteiga.

A tecnologia de bebidas oferece um largo espectro de aplicações para a tecnologia de separação. Centrífugas e Decanters têm sido muito utilizados nos processos de produção de cerveja, vinho, café, sucos de

frutas, vinhos frisantes; champanhe, óleos cítricos, chá, leite de soja.. Nestas indústrias a presença de destes equipamentos assegura um processamento econômico e alta qualidade no produto final.

Forças envolvidas no processo de separação

Em um movimento circular a aceleração proporcionada pela força centrífuga é:

$$a_e = r\omega^2 \quad (1)$$

onde a_e é a aceleração, r é o raio da trajetória, m a massa da partícula e ω (Omega) é a velocidade angular.

A força centrífuga sobre uma partícula girando em uma trajetória circular é dada por:

$$F_c = m a_e = m r \omega^2 \quad (2)$$

Onde F_c é a força centrífuga que atua sobre a partícula de massa m . Uma vez que $\omega = v/r$, onde v é a velocidade tangencial da partícula temos que:

$$F_c = (m v^2) / r \quad (3)$$

A velocidade de rotação é normalmente expressada em rotações por minuto (RPM), onde $\omega = 2 \pi N/60$, desta forma a equação pode ser escrita como:

$$F_c = m r (2 \pi N/60)^2 = 0.011 m r N^2 \quad (4)$$

onde N é a velocidade de rotação em RPM.

Se compararmos com a força da gravidade (F_g) sobre a partícula, que é $F_g = m g$, pode-se observar que a aceleração centrífuga, igual a $0.011 r N^2$, substituiu a aceleração da gravidade, igual a g . A força centrífuga é muitas vezes expressa, por razões comparativas com relação a proporção a "g".

A força centrífuga depende então do raio da velocidade de rotação e da massa da partícula. Se o raio de rotação e a velocidade estão fixados o fator que irá controlar é o peso da partícula, desta forma quanto mais pesada ela é maior será a força sobre ela exercida. Conseqüentemente se dois líquidos são colocados em um vaso girando sobre seu eixo vertical a uma alta velocidade, sendo um deles duas vezes mais denso, a força centrífuga por unidade de volume será duas vezes maior sobre o líquido mais pesado comparativamente ao mais leve. O líquido mais pesado irá ocupar o espaço externo do vaso enquanto o líquido mais leve irá ocupar o centro.

Para os processos de sedimentação que ocorrem na abrangência da lei de Stokes, pode-se obter a velocidade terminal de sedimentação em um raio "r" substituindo a aceleração da gravidade g por $\omega^2 r$. Então a equação pode ser escrita da seguinte forma:

$$v_t = \frac{\omega^2 r D_p^2 (\rho_p - \rho)}{18\mu} \quad (5)$$

Onde v_t é a velocidade terminal de queda de uma partícula esférica de diâmetro D_p , no ponto de raio r num campo centrífugo cuja velocidade angular de rotação é ω . Na figura 1 é mostrada a trajetória de uma partícula movendo-se do ponto A até o ponto B dentro de uma centrífuga.



Figura 1: Sedimentação de uma partícula em uma centrífuga de vaso tubular

Uma vez que a velocidade terminal $v_t = dr/dt$, temos:

$$dt = \frac{18\mu}{\omega^2(\rho_p - \rho)D_p^2} \frac{dr}{r} \quad (6)$$

Integrando entre os limites $r=r_1$ em $t=0$ e $r=r_2$ em $t= t_T$,

$$t_T = \frac{18\mu}{\omega^2(\rho_p - \rho)D_p^2} \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (7)$$

O tempo de residência t_T é igual ao volume (m^3) do vaso dividido pela taxa volumétrica de alimentação q (m^3/s), onde o volume é igual a $V = \pi b(r_2^2 - r_1^2)$. Substituindo na equação acima temos:

$$q = \frac{\omega^2(\rho_p - \rho)D_p^2}{18\mu \ln(r_2/r_1)} V = \frac{\omega^2(\rho_p - \rho)D_p^2}{18\mu \ln(r_2/r_1)} \pi b(r_2^2 - r_1^2) \quad (8)$$

O diâmetro que aparece na equação é o de uma partícula que percorre a distância entre r_1 e r_2 durante o tempo de residência que lhe é concedido. Partículas menores não irão alcançar a parede do vaso e serão removidas com o líquido mais leve.

Diâmetro da partícula de corte, D_{pc}

O diâmetro da partícula de corte pode ser definido como o diâmetro da partícula que alcança a metade da distância entre r_1 e r_2 . Esta partícula percorre uma distância equivalente à metade da camada líquida ou $(r_2-r_1)/2$ durante o tempo de residência. A partir da integração da equação 6 entre $r=(r_1+r_2)/2$ em $t=0$ e $r=r_2$ em $t=t_T$ obtemos:

$$q_c = \frac{\omega^2(\rho_p - \rho)D_{pc}^2}{18\mu \ln[2r_2/(r_1 + r_2)]} V = \frac{\omega^2(\rho_p - \rho)D_{pc}^2}{18\mu \ln[2r_2/(r_1 + r_2)]} \pi b(r_2^2 - r_1^2) \quad (9)$$

Este diâmetro D_{pc} é o "diâmetro crítico" ou "diâmetro de corte". As partículas com $D > D_{pc}$ sedimentarão preferencialmente da fase líquida, e as partículas $D < D_{pc}$ permanecerão em suspensão e serão arrastadas para fora da centrífuga pelo líquido.

Separação líquido-líquido.

A separação de um componente de uma mistura líquido-líquido onde os líquidos são imiscíveis, mas estão dispersos como em uma emulsão, é uma operação comum na indústria de alimentos. Por exemplo: na indústria de laticínios é bastante comum a separação por centrifugação do leite integral separando-o em leite desnatado e nata. No equipamento de separação o leite é alimentado continuamente na máquina que pode ser aproximado a um vaso que gira sobre um eixo vertical onde a nata e leite desnatado são obtidos nas saídas do equipamento. Num ponto dentro do vaso para que a separação ocorra deve haver uma interface de separação entre a nata e o leite desnatado.

Nas separações líquido-líquido, a posição dos vertedores de saída torna-se mais importante do que no caso das separações entre sólidos e líquido, pois além de controlar o volume retido no centrifugador e o diâmetro crítico das partículas, determina também se é possível ou não a separação.

A força centrífuga do fluido a uma distância r é:

$$F_c = m r \omega^2 \quad (10)$$

Considerando um cilindro como indicado na Figura 2 (a) a força diferencial dF_c ao longo da espessura dr é:

$$dF_c = (dm) r \omega^2 \quad (11)$$

Onde

$$dm = 2 \cdot \pi \cdot \rho \cdot r \cdot b \cdot dr \quad (12)$$

onde b é a altura do vaso e $2\pi r dr$ é o volume do fluido e ρ é a sua densidade. Substituindo equação 12 na equação 11 e dividindo ambos lados pela $A = 2 \pi r b$, temos:

$$dP = \frac{dF_c}{A} = \omega^2 \rho \cdot r dr \quad (13)$$

A equação 13 mostra a variação radial da pressão ao longo da centrífuga. Integrando a equação entre r_1 e r_2 temos:

$$P_2 - P_1 = \rho \omega^2 (r_2^2 - r_1^2)/2 \quad (14)$$

Considerando a Figura 2(b), que representa o vaso de uma centrífuga contínua, onde a alimentação é realizada próximo ao eixo. O líquido pesado é liberado através da abertura 1 enquanto o líquido leve é liberado pela abertura 2. Na representação esquemática r_1 é o raio para a descarga do líquido pesado e r_2 o raio para a descarga do líquido leve. Em um raio r_n há a separação entre as duas fases. Para um sistema estar em equilíbrio hidrostático as pressões em ambos os lados da interface devem ser iguais. Desta forma aplicando a equação acima para encontrar a pressão de cada componente no raio r_n temos:

$$\rho_A \omega^2 (r_n^2 - r_1^2) / 2 = \rho_B \omega^2 (r_n^2 - r_2^2) / 2 \quad (15)$$

$$r_n^2 = (\rho_A r_1^2 - \rho_B r_2^2) / (\rho_A - \rho_B) \quad (16)$$

onde ρ_A é a densidade do líquido pesado e ρ_B é a densidade do líquido leve.

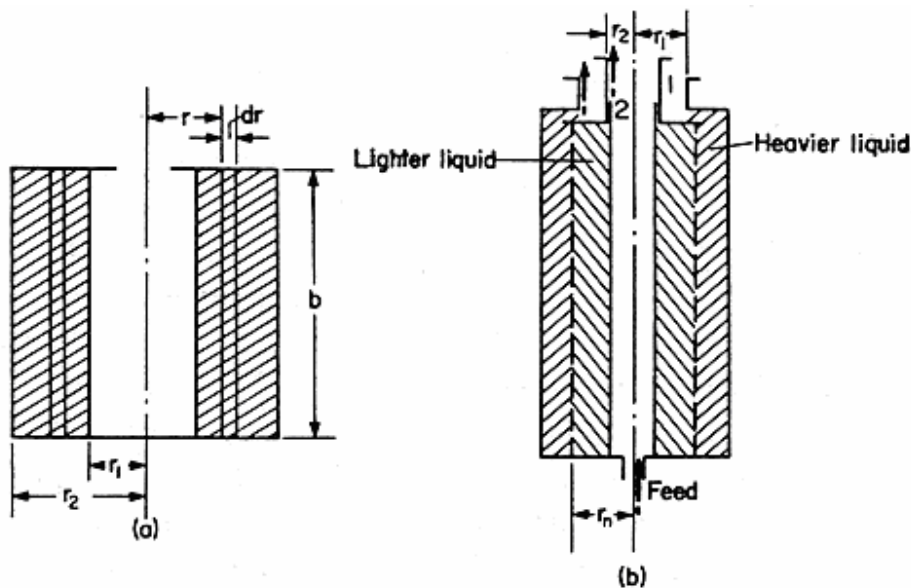


Figura 2: Centrífuga para separar líquidos: (a) diferença de pressões (b) zona neutra r_n .

Exemplo 1

Quantas vezes a força "g" pode ser obtida em uma centrífuga que gira a 2000 RPM em um raio de 10 cm?

$$F_c = 0.011 mrN^2$$

$$F_g = mg$$

$$\begin{aligned}
 F_c / F_g &= (0.011 r N^2) / g \\
 &= (0.011 \times 0.1 \times 2000^2) / 9.81 \\
 &= \underline{450}
 \end{aligned}$$

Exemplo 2

Uma solução viscosa tem partículas de densidade igual a 1461 kg/m^3 é clarificada por centrifugação. A densidade da solução é de 801 kg/m^3 e sua viscosidade é de 100 cp . O vaso da centrifuga tem $r_2 = 0,02225 \text{ m}$ e $r_1 = 0,00716 \text{ m}$ e uma altura (b) de $0,1970 \text{ cm}$. Determine o diâmetro crítico das partículas na corrente de saída se $N = 23.000$ rotações por minuto e a taxa de fluxo é de $q = 0,002832 \text{ m}^3/\text{h}$.

Como $w = 2 \pi N / 60$; temos que $w = 2 \pi 23.000 / 60 = 2410 \text{ rad /s}$

O volume da centrifuga é $V = \pi b(r_2^2 - r_1^2)$

$$V = 2,747 \times 10^{-4} \text{ m}^3$$

Considerando a viscosidade $\mu = 0,1 \text{ Pa.s} = 0,100 \text{ kg / m . s}$

$$E \text{ que } q_c = (0,002832 \text{ m}^3/\text{h}) / (1\text{h} / 3600 \text{ s}) = 7,87 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$$

Substituindo na equação

$$q_c = \frac{\omega^2 (\rho_p - \rho) D_{pc}^2}{18 \mu \ln[2r_2 / (r_1 + r_2)]} V$$

Temos que $D_{pc} = 0,746 \times 10^{-6} \text{ m}$

Exemplo 3

Na separação centrífuga da nata utiliza-se um separador com raio de descarga de 5 cm e $7,5 \text{ cm}$. Se a densidade do leite desnatado é 1032 kg/m^3 e de nata é 915 kg/m^3 , calcule o raio da zona neutra de forma que o ponto de alimentação possa ser projetado.

Dados: $\rho_A = 1032 \text{ kg m}^{-3}$, $\rho_B = 915 \text{ kg m}^{-3}$

A partir da equação para calcular r_n temos:

$$\begin{aligned}
 r_n^2 &= [1032 \times (0.075)^2 - 915 \times (0.05)^2] / (1032 - 915) \\
 &= 0.03 \text{ m}^2 \\
 r_n &= 0.17 \text{ m} \\
 &= 17 \text{ cm}
 \end{aligned}$$

Bibliografia consultada.

Earle, R. L. e Earle, M. D. Unit operations in food processing

Geankoplis, C. J. "Transport Process and Unit Operations" Ed. Prentice Hall (1993)