



PARTE VI DESAGUAMENTO



CAPÍTULO 23 – ENSAIOS DE SEDIMENTAÇÃO

Silvia Cristina Alves França

Engenheira Química/UFS, Mestre e Doutora em
Engenharia Química/COPPE-UFRJ
Tecnologista III do CETEM/MCT

Rui de Góes Casqueira

Engenheiro Químico/UFRRJ, Mestre em
Engenharia de Materiais/UFSCar e Doutor em
Engenharia Metalúrgica/PUC-Rio
Professor da UFRRJ

1. INTRODUÇÃO

A sedimentação é um dos processos de separação sólido-líquido baseado na força gravitacional. De baixo custo e simplicidade operacional, baseia-se na diferença entre as densidades dos constituintes sólidos ou em outras propriedades, como diâmetro de partículas, para promover a separação sequencial de sólidos ou das fases sólida e líquida.

O estudo da sedimentação com cunho científico iniciou-se no começo do século XX, em 1912 com Mishler, que calculava a área da seção transversal de um sedimentador, baseando-se na suposição de igualdade entre as velocidades de sedimentação e de líquido ascendente. Com base nessa premissa, diversos pesquisadores desenvolveram novos estudos para obter maior conhecimento do mecanismo do processo de sedimentação, bem como para elaborar procedimentos de projeto de sedimentadores (França, 1996).

A vasta utilização industrial dos sedimentadores promove um crescente interesse em se entender o dimensionamento e da operação desses equipamentos, com a finalidade de melhorar o seu desempenho no atendimento às suas diferentes características operacionais (França, 1996). Os sedimentadores podem ser utilizados como espessadores ou classificadores, dependendo da sua função.

Os sedimentadores, mais utilizados na indústria mineral produzem polpas com percentagens de sólidos elevadas e possuem, geralmente, a função de espessar material com valor comercial ou rejeito, visando a sua disposição em barragens, cavas de minas ou como *backfil* de galerias de minas subterrâneas. Estes são os mais utilizados na indústria mineral.

Os clarificadores caracterizam-se pela produção de uma polpa com baixa percentagem de sólidos. Esses equipamentos são indicados quando se deseja recuperar a fase líquida, como na recirculação de água nos processos industriais ou recuperação de soluções de lixiviação dos processos hidrometalúrgicos.

Sob o aspecto da separação sólido-líquido, o projeto de sedimentadores contínuos está basicamente relacionado ao cálculo da área da seção de sedimentação e da altura do equipamento (Massarani, 2002). Os dados para

projeto de um sedimentador contínuo e outras informações operacionais desta unidade são determinados por meio de ensaios de proveta em laboratório, que serão objeto das instruções contidas neste Capítulo.

2. PROCESSO DESCONTÍNUO DE SEDIMENTAÇÃO

A sedimentação é uma operação baseada no transporte de partículas sólidas através de um meio líquido. Tais partículas estão sujeitas às forças da gravidade, empuxo e resistência ao movimento. Esses fenômenos podem ser melhor entendidos com base no conhecimento dos princípios básicos do processo da sedimentação descontínua (batelada) em bancada.

Aspectos Teóricos da Sedimentação

Considere-se uma suspensão homogênea de partículas submetida à força gravitacional. No tempo $t = 0$, todas as partículas estão dispersas no meio líquido (Figura 1). No tempo $t = t_1$, as partículas de maior densidade começam a se movimentar, por ação da força da gravidade, no sentido do fundo da proveta. As partículas de densidade menor permanecem em equilíbrio com o meio líquido. Entretanto, quando a força peso da partícula é maior do que a força exercida em sentido oposto, pelo líquido, as partículas de menor densidade também começam a se movimentar no sentido do fundo da proveta ($t = t_2$). Nesse momento, observa-se uma interface de partículas descendentes, com velocidades diferentes, que vão formando a região de compactação. Ao mesmo tempo em que essa interface desce, formando acima dela uma região de líquido clarificado, a interface inferior sobe, formando abaixo dela uma região de compactação (espessado). Nessa região, as partículas sólidas já começam a interagir entre si, aparecendo o efeito de resistência ao movimento ($t = t_3$).

Quando todas as partículas sólidas sedimentam, formando a região de compactação, o fenômeno que rege o processo passa a ser o de acomodação do leito de partículas compactadas ($t = t_4$). Em geral, nota-se uma pequena variação na altura desse leito de partículas, sendo mais acentuada quando a suspensão é composta por flocos, que tendem a se deformar devido ao peso da camada de líquido situada acima deles. Assim, o processo de empacotamento do leito ocorre de forma mais lenta.

Durante o ensaio de proveta registra-se o deslocamento da interface superior da polpa com o tempo, cujos dados foram utilizados na construção do gráfico da Figura 1b, com base no qual serão obtidas as informações operacionais para o projeto e operação de unidades contínuas.

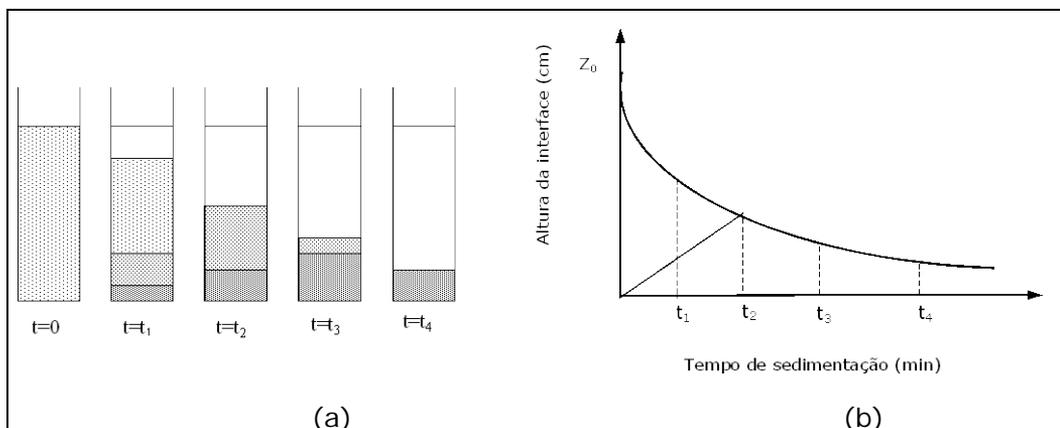


Figura 1 – Etapas do ensaio de proveta (a) e curva de sedimentação resultante do ensaio (b).

O processo de sedimentação é regido pela lei de Stokes, a qual considera que a velocidade de sedimentação de uma partícula isolada ($v_{t\infty}$) é função da sua densidade (ρ_s) e do seu diâmetro (D_p), ou seja:

$$v_{t\infty} = \frac{(\rho_s - \rho_f) g D_p^2}{18\mu} \quad [1]$$

onde:

- _f massa específica do fluido;
- _s massa específica do sólido ou partícula;
- μ viscosidade do fluido (no caso do espessador é a água).

Porém, existem vários fatores que influenciam o processo de sedimentação, tais como a natureza das partículas, o pré-tratamento da polpa e o efeito de concentração de sólidos. Esses fatores serão descritos a seguir.

Natureza das Partículas

Partículas esféricas, ou com forma aproximada à esférica, sedimentam com maior facilidade do que partículas de formato irregular. O mesmo pode ser notado para partículas com diâmetros maiores, que sedimentam mais rapidamente, enquanto as partículas muito finas tendem a permanecer em suspensão.

Os processos de floculação e coagulação reúnem as melhores alternativas de atenuar a irregularidade na forma da partícula, ou ainda no seu diâmetro. Desse modo, o processo de aglomeração das partículas forma unidades maiores e de formato mais regular, que, conseqüentemente, sedimentam mais facilmente. A coagulação das partículas é um tipo de pré-tratamento da polpa, antes desta ser submetida ao processo de sedimentação.

Efeito da Percentagem de Sólidos

Ao sedimentar livremente, uma partícula mineral em um meio fluido sofre apenas a resistência do líquido ao seu movimento (empuxo). Quando isolada, ou com poucas partículas, esta descreve uma trajetória descendente livre e sedimenta, utilizando para isso um tempo t .

Quando há várias partículas sedimentando no meio fluido, existe a probabilidade de mais de uma partícula ter a mesma trajetória. Assim, há também partículas de diferentes tamanhos e/ou densidades sedimentando ao mesmo tempo, com velocidades terminais diferentes. Dessa forma, quanto maior a percentagem de sólidos em uma suspensão, menor será a velocidade de sedimentação dessas partículas sólidas (efeito de população), pois a taxa de sedimentação deixa de ser constante para tornar-se decrescente.

Prática da Sedimentação em Bancada

O projeto de uma unidade contínua de sedimentação baseia-se no cálculo de sua área transversal e da sua altura, com base em dados de velocidade de sedimentação e concentração máxima da polpa formada na operação de sedimentação descontínua. Esses dados são obtidos por meio da execução de ensaios de proveta.

O ensaio de proveta consiste em um teste de sedimentação descontínua, que tem o objetivo de acompanhar o deslocamento da interface superior de uma suspensão ao longo do tempo, numa proveta de 2 L. As informações necessárias ao projeto de sedimentadores contínuos são obtidas por meio deste ensaio, quais sejam:

- (i) velocidade de sedimentação da fase sólida (deslocamento da interface superior);
- (ii) concentração final de sólidos no sedimento;
- (iii) tempo necessário para a sedimentação e exigido pelo projeto de sedimentadores contínuos.

A curva de sedimentação fornece dados sobre a natureza da polpa, embora se saiba que o comportamento de uma polpa difere do processo descontínuo (batelada) para o contínuo.

Etapas do Ensaio de Sedimentação

A movimentação descendente das partículas ou flocos em uma polpa, num ensaio de proveta, deverá ser apenas função do tempo e da concentração dos sólidos. Dessa forma, a proveta deverá ser colocada em uma bancada plana e livre de vibrações.

Outro ponto importante a ser observado é que, muitas vezes, a interface não é de fácil visualização, pois dependerá da concentração da suspensão estudada. Assim, para a sua melhor visualização é importante que a proveta contendo a polpa esteja posicionada contra paredes ou anteparas de cores que contrastem com a cor da polpa, ou ainda contra a luminosidade. Por exemplo, polpas de material escuro (hematita, bauxita ou carvão) serão melhor visualizadas contra a luminosidade ou contra paredes brancas; polpas de caulim contrastam bem com fundos escuros.

O ensaio deve ser realizado para uma polpa de concentração inicial conhecida, fazendo-se necessário também o conhecimento da massa específica do sólido, para cálculos posteriores.

Para a execução do ensaio será necessário um volume mínimo de 2 L desta polpa, pois este é o volume padrão das provetas para a realização do

ensaio. O ideal é que uma escala milimetrada seja colocada na proveta (Figura 2), o que facilita a medida do deslocamento espacial da interface com o tempo. A polpa deve ser homogeneizada e alimentada na proveta, até a marcação do volume de 2 L.

Ao completar o volume da proveta (2 L) com a polpa, deve-se anotar a altura inicial da interface e acionar o cronômetro para marcar o tempo do ensaio. O deslocamento da interface se dá com maior velocidade na etapa inicial, chamada de etapa de sedimentação livre, por isso, a altura deve ser anotada pelo operador em intervalos de tempos pré-estabelecidos, exemplo de 30 s ou 1 min. O operador deverá ter sensibilidade para verificar o melhor intervalo de observação.

Ao final do ensaio, quando a maioria das partículas já sedimentou e ocorre apenas o empacotamento do leito de sólidos no fundo da proveta, o operador perceberá que a variação de altura da interface se dará muito lentamente. Nesse momento, o intervalo de tempo de observação poderá ser aumentado, até ocorrer a estabilidade no valor da altura da região de compactação de sólidos, ou que esta varia muito pouco em um grande intervalo de tempo.

Na seqüência da Figura 2, pode-se observar diferentes estágios de um ensaio de sedimentação descontínua em laboratório.

Situação (a) - momento inicial do teste: a polpa está homogênea em toda a proveta.

Situação (b) - durante o ensaio: pode-se visualizar a interface de sólidos na altura mediana da proveta.

Situação (c) - no final do ensaio: quando não há mais a sedimentação das partículas, nota-se o leito de partículas compactadas no fundo da proveta (produto espessado).

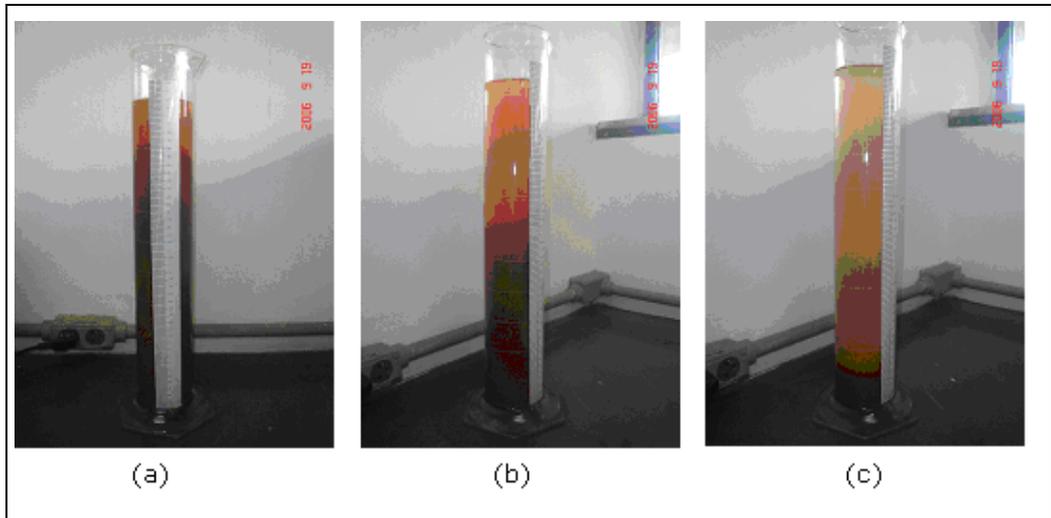


Figura 2 – Seqüência experimental de um ensaio de proveta realizado no laboratório do CETEM.

Ao término do ensaio de sedimentação descontínua, o operador deverá usar os dados de altura da interface e tempo para traçar a curva de sedimentação (Figura 1b).

Na Tabela 1 encontram-se os resultados de um teste de proveta para uma polpa de finos de bauxita, com concentração de 20% de sólidos.

O projeto dessas unidades, com base nos resultados dos ensaios em laboratório, permite estudar as variáveis que serão aplicadas ao processo contínuo de sedimentação. Assim, são necessárias poucas correções inerentes ao projeto dos espessadores contínuos, tanto para escala piloto quanto industrial.

Tabela 1 – Planilha para registro de dados de ensaio de sedimentação em proveta.

Data: 03/10/2006		Material: finos de bauxita (- 400 Mesh) (-37 μ m)	
Concentração inicial (g/L): 200 (20%)		Densidade do sólido (kg/m ³): 2.810	
Tempo (min)	Altura de interface (cm)	Tempo (min)	Altura de interface (cm)
0	42,0	6,5	13,0
1,0	39,0	7,0	11,0
1,5	36,0	7,5	9,0
2,0	33,0	8,0	7,0
2,5	31,0	9,7	6,0
3,0	28,0	11,0	5,5
3,5	26,0	12,5	5,0
4,0	24,0	15,3	4,5
4,5	22,0	18,3	4,0
5,0	12,0	25,0	3,5
5,5	17,0	35,0	3,0
6,0	15,0	-	-

Projeto de Sedimentadores

O projeto consiste basicamente no cálculo do diâmetro e da altura do sedimentador, com a finalidade de espessar ou clarificar uma determinada polpa (Damasceno e Massarani, 1993). Para tanto, os dados obtidos nos testes de laboratório devem ser confiáveis, além de consistentes. A seguir será descrita a metodologia de Kynch (1952) para cálculo dessas variáveis.

Método de Kynch (1952)

Em seu trabalho, Kynch estabeleceu um método para determinar o par de variáveis, concentração (C) e velocidade de sedimentação (v_s), necessário ao cálculo do fluxo de sólidos, com apenas um teste de proveta. Essa metodologia ficou conhecida como o método das tangentes.

O método simplificado das tangentes consiste no traçado de uma reta tangente ao ponto de inflexão da curva de sedimentação, como mostrado na Figura 3. Uma simplificação matemática da metodologia de Kynch foi introduzida por Biscaia Jr. (1988), tornando mais fácil a determinação gráfica das variáveis de projeto, que são determinadas pelas Equações [2] e [3]. Essas equações permitem calcular a concentração a e velocidade de sedimentação de sólidos em diferentes alturas da proveta, durante o ensaio de sedimentação.

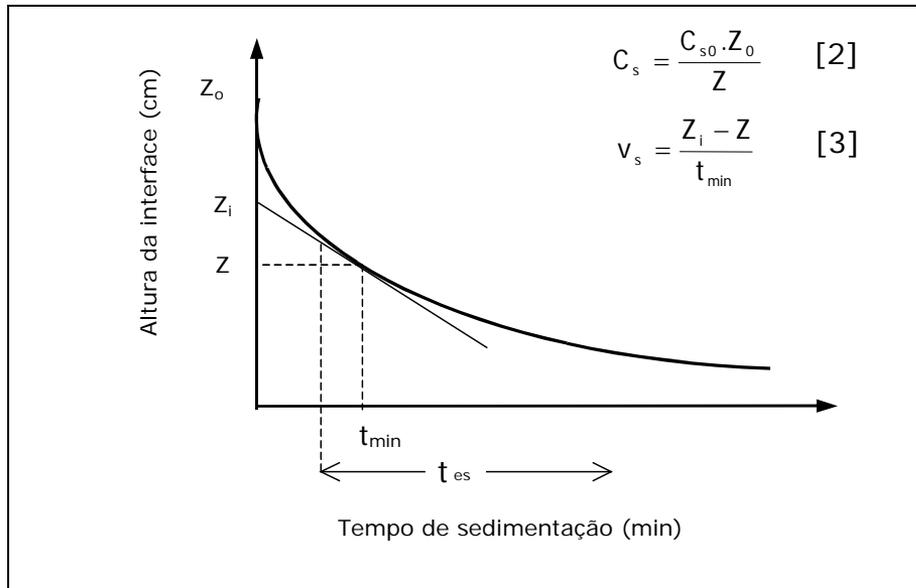


Figura 3 – Determinação das variáveis de projeto pelo método de Kynch simplificado.

Com a aplicação do método de Kynch simplificado (Biscaia, 1988) à curva de sedimentação, é possível determinar:

- (i) os valores de Z_i (ponto no qual a tangente toca o eixo y);
- (ii) o ponto no qual a reta tangente toca a curva fornece os valores de Z e t_{min} , que são a altura da região de compactação e o tempo mínimo necessário à formação da região de compactação;
- (iii) t_{res} , o tempo de residência da partícula sólida na região de compactação, necessário à formação do material espessado.

Com estas informações é possível calcular a capacidade de projeto do sedimentador $(Q/A)_{\text{proj}}$, ou seja, a vazão máxima de suspensão que poderá ser alimentada com uma determinada área de seção transversal, respeitando as velocidades de sedimentação dos sólidos de uma dada polpa.

A capacidade de projeto e a vazão de alimentação do sedimentador (F) são dadas, respectivamente, pelas Equações [4] e [5]:

$$\left(\frac{Q}{A}\right)_{\text{proj.}} = \frac{Z_0}{t_{\text{min}}} \quad [4]$$

$$v_s = \frac{Q}{A} \quad [5]$$

onde:

- Q vazão de alimentação de polpa (m^3/h);
- A área da seção transversal do espessador (m^2);
- Z₀ altura inicial da interface no teste de proveta (m);
- t_{min} tempo mínimo necessário à formação do espessado com uma dada percentagem de sólidos (h);
- v_s velocidade superficial dos sólidos (m/h).

Conhecendo-se a vazão de alimentação da polpa que irá alimentar o espessador e os demais dados provenientes da sedimentação em batelada (curva de proveta), calcula-se o diâmetro do sedimentador (D).

A altura é calculada por meio da soma das alturas de três regiões específicas:

- H₁ - altura da região de líquido clarificado;
- H₂ - altura da região de compactação;
- H₃ - altura da camada de espessado já no ponto de retirada.

Conclui-se que:

$$H = H_1 + H_2 + H_3 \quad [6]$$

Por convenção, o valor de H_1 pode variar entre 0,45 e 0,75 m.

$$H_2 = \frac{4}{3} \left(\frac{Q}{A} \right) \frac{C_{s0} t_{res}}{\rho_s} \left(\frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_{esp.} - \rho_f} \right) \quad [7]$$

$$H_3 = 7,3 \cdot 10^{-2} D. \quad [8]$$

Nas equações acima, ρ é a massa específica de sólido (s), fluido (f) e do espessado ($esp.$).

A massa específica do espessado formado pode ser determinada por balança *Marcy* ou pelo método da pesagem da proveta vazia (antes do ensaio) e com suspensão (ao final do ensaio), como descrito em Chaves (2004). Deve-se ainda conhecer a concentração inicial da suspensão, bem como a densidade dos sólidos que a compõem.

Exemplo prático de determinação de curva de sedimentação e projeto de espessador contínuo

Deseja-se espessar uma polpa de bauxita contendo 20% de sólidos. A vazão de alimentação da polpa é de 1200 m³/h e a concentração final de sólidos deverá ser igual a 50%. Para calcular o diâmetro e a altura do espessador, no qual este adensamento será realizado, deve-se considerar os valores de massa específica do sólido e do espessado como sendo, respectivamente, $\rho_s = 2.600 \text{ kg/m}^3$ e $\rho_{esp.} = 1.460 \text{ kg/m}^3$.

Para isso, a polpa foi submetida a um pré-tratamento por coagulação, devido ao tamanho reduzido das partículas e, em seguida, submetida ao ensaio de proveta. Na Figura 4 consta a curva de sedimentação resultante desse teste. Verifica-se a determinação de t_{min} pelo método da tangente, t_{res} foi determinado pelo ponto da curva no qual não houve mais variação de altura, considerando que, desde esse ponto, a concentração de sólidos tem valor máximo.

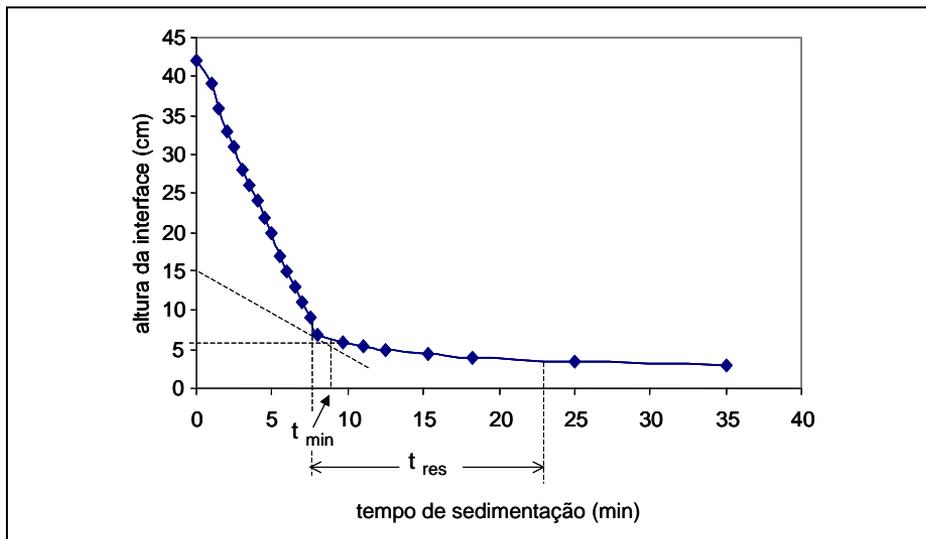


Figura 4 – Curva de sedimentação para uma polpa de bauxita (-37 μm) com 20% de sólidos.

Na curva de sedimentação acima, foi traçada a reta tangente ao primeiro ponto de inflexão da curva, fornecendo os seguintes valores operacionais: $t_{\text{min}} = 8,3 \text{ min}$ e $t_{\text{res}} = 15 \text{ min}$.

Então:

$$\left(\frac{Q}{A}\right)_{\text{proj}} = \frac{42}{8,3} = 5,06 \text{ cm/min} = 3,04 \text{ m/h}$$

sendo $Q = 1200 \text{ m}^3/\text{h}$, chega-se ao valor aproximado de $A = 395 \text{ m}^2$.

Como a área da seção transversal de um espessador é dada por:

$$A = \frac{\pi D^2}{4} \quad [9]$$

Então, seu diâmetro deverá ter 22,4 m.

A altura final do espessador, determinada pelas Equações (6), (7) e (8), deverá ser de 2,74 m.

Correções nos cálculos da altura e diâmetro dos espessadores devem ser realizadas, quando os resultados de projeto não forem condizentes com a realidade experimental (Chaves, 2004).

Na seção seguinte serão descritos alguns tipos de espessadores mais utilizados na indústria mineral.

Tipos de Espessadores

Os tipos de espessadores variam em função da granulometria do material e da forma como o equipamento é alimentado. De maneira geral, os espessadores industriais consistem em tanques de concreto, equipados com um mecanismo de raspagem do espessado, que corresponde ao maior custo no projeto do equipamento. Os raspadores são “braços” de estrutura metálica, acoplados ao tubo de alimentação, que têm a função de carrear o material espessado para o ponto de retirada. São movimentados por motores e necessitam de flexibilidade operacional. Assim, o equipamento pode atuar com diferentes tipos de suspensões e sob diferentes condições operacionais - diferentes volumes e cargas impostas - (Svarovsky, 1981; França e Massarani, 2004). A seguir são citados alguns tipos de espessadores.

Espessador Contínuo Convencional

Nesse tipo de espessador a alimentação da suspensão é feita pela parte superior do equipamento. As partículas sólidas sedimentarão livremente e formarão no fundo do equipamento a região de compactação ou de espessado. É um tanque provido de entrada para a suspensão e retirada de espessado, com auxílio de braços raspadores equipados com paletas, como ilustra a Figura 5.

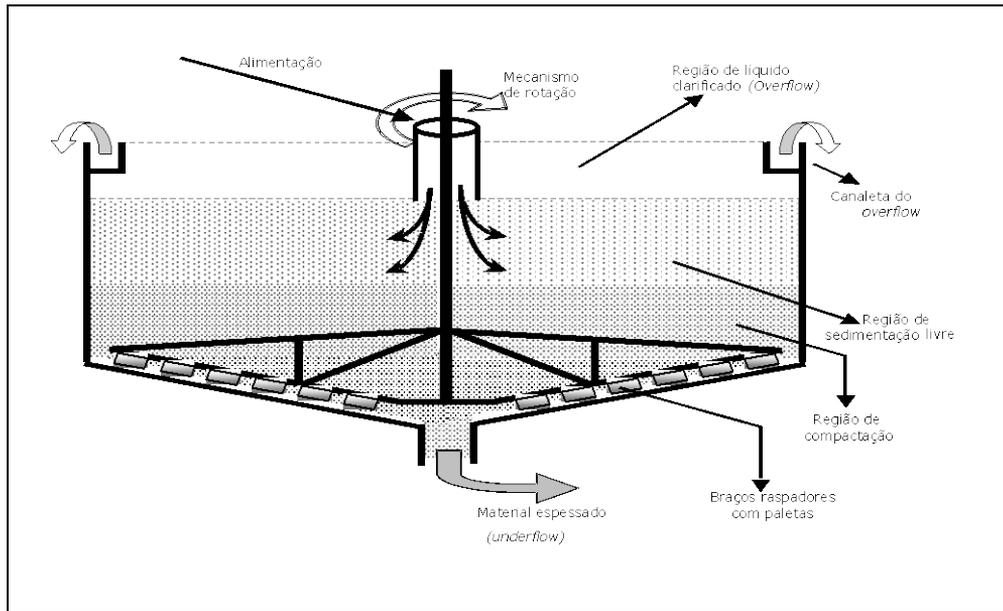


Figura 5 – Diagrama ilustrativo de um espessador contínuo convencional, tipo Dorr-Oliver.

a - Espessadores Contínuos de Alta Capacidade

A capacidade do espessador é influenciada (aumentada) por modificações estruturais de projeto do equipamento. Neste caso pode-se citar os espessadores de lamelas (Carvalho, 1998) e os de alimentação submersa (França, 2000).

A grande vantagem dos espessadores de alta capacidade está, obviamente, na capacidade de tratamento de um volume maior de suspensão, sem que sejam necessárias mudanças no diâmetro e altura do equipamento. Esse fato é muito atraente industrialmente, em especial devido à área necessária à montagem dessas unidades.

a.1 – Espessador de Lamelas

Essa unidade de espessamento consiste numa série de placas inclinadas, dispostas paralelamente, formando canais. A capacidade nesse tipo de equipamento é medida pela área projetada das placas, que é maior que a área do equipamento, caso as placas não existissem. Outra vantagem dessa

configuração é que o tempo de sedimentação é menor, pois é proporcional à altura de queda vertical, a qual pode ser reduzida, por meio da redução do espaçamento entre as lamelas.

a.2 – Espessador com Alimentação Submersa

Nesse tipo de equipamento a alimentação é feita em um ponto no interior da camada de compactação dos sólidos (Figura 6). O aumento da capacidade se dá devido às partículas da suspensão já serem alimentadas no leito de sólidos já sedimentados, onde ficam aprisionadas. O líquido da suspensão percola, no sentido ascendente, através desse leito de partículas, isto é, na direção da região de líquido clarificado.

Porém, nem todas as partículas são mantidas aprisionadas no leito de sólidos e, por isso, acima da interface da região de compactação forma-se uma região de concentração de sólidos constante. Essa região inclui características semelhantes às da região de sedimentação livre, entretanto, é mais conveniente chamar de região de fluidização, já que as partículas são mantidas suspensas pelo movimento ascendente do líquido.

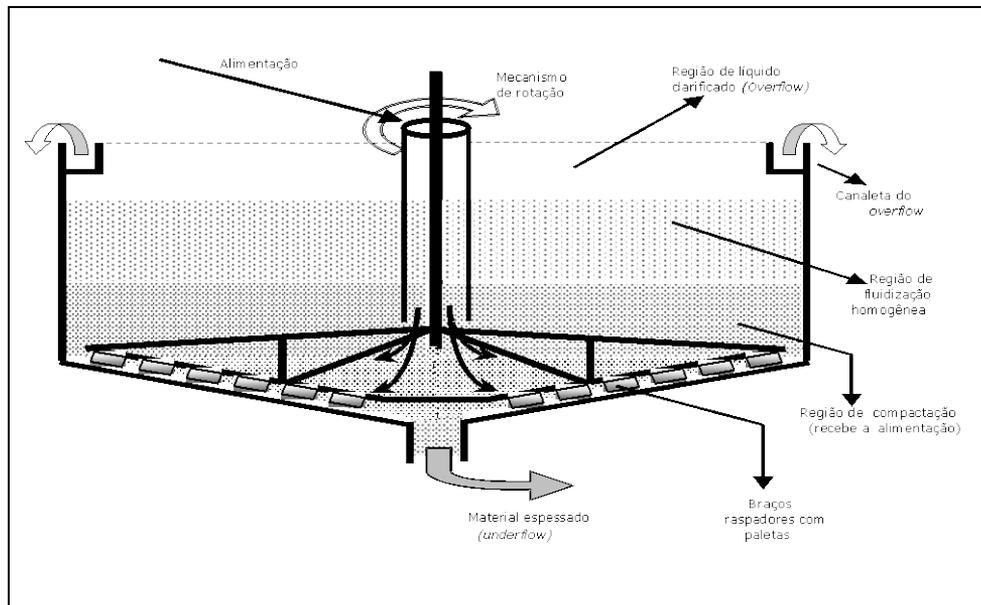


Figura 6 – Diagrama ilustrativo de um espessador contínuo de alta capacidade com alimentação submersa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Biscaia Jr., E.C. Simplificação matemática do método de Kynch. Comunicação pessoal, 1988.
- Carvalho, S.H.V. Projeto e análise do desempenho de um sedimentador lamelado piloto para suspensões flocculentas. Tese (Doutorado). Rio de Janeiro: PEQ/COPPE/UFRJ, 1998, 78p.
- Chaves, A.P. Teoria e prática do tratamento de minérios. 2ª Ed. São Paulo: Signus Editora, 2004, 199p.
- Damasceno, J.J.R. e Massarani, G. O projeto de sedimentadores contínuos. *Ciência e Engenharia – UFU*, nº 2, ano 2, jul-dez, 1993, p.61-76.
- França, S.C.A. Operação de espessadores não convencionais. Dissertação (Mestrado). Rio de Janeiro: PEQ/COPPE/UFRJ, 1996, 55p.
- França, S.C.A. Equações constitutivas para a sedimentação de suspensões flocculentas. Tese (Doutorado). Rio de Janeiro: PEQ/COPPE/UFRJ, 2000, 96p.
- França, S.C.A. e Massarani, G. Separação sólido-líquido. In: Luz, A. B., Sampaio, J. A. e Almeida, S. L. M. (Ed.). *Tratamento de Minérios*. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2004, p. 573-609.
- Kynch. A theory of sedimentation. *Trans. Faraday Society*, nº 48, 1952, p.166-176.
- Massarani, G. *Fluidodinâmica em sistemas particulados*. Rio de Janeiro: Ed. UFRJ, 2002, 152p.
- Svarovsky, L. *Solid-Liquid Separation*. Butterworth & Co. Ltd, 2nd edition, Bradford-UK, 1981, 556p.