

OPERAÇÕES DE SEPARAÇÃO SÓLIDO-LÍQUIDO

A etapa de separação sólido-líquido está entre as operações unitárias mais importantes que hoje são empregadas em indústrias químicas, têxteis, farmacêuticas, no beneficiamento de minério, bem como no processamento de alimentos, tratamento de água e resíduos, entre outras, pois muitos dos produtos industriais são suspensões de sólidos em líquidos.

Existem dois critérios de classificação dos métodos de separação:

a) Quanto ao movimento relativo das fases:

Decantação: onde o sólido se move através do líquido em repouso. Esta pode ser subdividida de acordo com a concentração da suspensão. A clarificação de líquidos envolve suspensões diluídas e tem como objetivo obter a fase líquida com um mínimo de sólidos. O espessamento de suspensões visa obter os sólidos com um mínimo de líquido, partindo de suspensões concentradas.

Filtração: operação na qual o líquido se move através da fase sólida estacionária.

b) Quanto a força propulsora

As operações são gravitacionais, centrífugas, por diferença de pressão ou eletromagnéticas.

Então, com a combinação destes critérios, tem-se a seguinte divisão:

1. Separação por decantação
 - Clarificação de líquidos
 - Espessamento de suspensões
 - Lavagem de sólidos
2. Decantação invertida (Flotação)
3. Separação centrífuga
4. Filtração

Separação por Decantação (Sedimentação Gravitacional)

Definida como o movimento de partículas no seio de uma fase fluida, provocado pela ação da gravidade. Geralmente as partículas sólidas são mais densas que o fluido. O caso em particular que será estudado é o

de partículas sólidas que decantam através de uma fase líquida, apesar de haver decantação de sólidos ou líquidos em gases.

A decantação pode ter como objetivo a clarificação do líquido, o espessamento da suspensão ou ainda a lavagem dos sólidos.

Clarificação do líquido: tem-se inicialmente uma suspensão com baixa concentração de sólidos para obter um líquido com um mínimo de sólidos.

Espessamento da suspensão: inicialmente se tem uma suspensão concentrada para obter os sólidos com uma quantidade mínima possível de líquido. Geralmente tem a finalidade de reduzir o tamanho de filtros ou de centrífugas. Um decantador pode funcionar como clarificador ou espessador.

Lavagem dos sólidos: é a passagem da fase sólida de um líquido para outro, para lavá-la sem filtrar (operação mais dispendiosa). Esse processo pode ser realizado em colunas onde a suspensão alimentada pelo topo é tratada com um líquido de lavagem introduzido pela base. A decantação das partículas sólidas realiza-se em suspensão de concentração praticamente constante. Porém são operações instáveis, pois existem escoamentos preferenciais intensos causados pelas diferenças locais de concentração. Uma alternativa é utilizar decantadores em série operando em contracorrente.

Tipos de Decantação

A decantação pode ser livre ou retardada. No primeiro tipo as partículas encontram-se bem afastadas das paredes do recipiente e a distância entre cada partícula é suficiente para garantir que uma não interfira na outra. Segundo Taggart, para que a sedimentação seja "livre" o número de colisões entre as partículas não pode ser exagerado, portanto pode-se ter sedimentação livre em suspensões concentradas.

A decantação retardada ou ainda decantação com interferência ocorre quando as partículas estão muito próximas umas das outras, sendo muito freqüente o número de colisões.

De um modo geral os fatores que controlam a velocidade de decantação do sólido através do meio resistente são:

- as densidades do sólido e do líquido;
- o diâmetro e a forma das partículas;
- a viscosidade do fluido.

A viscosidade do fluido é influenciada pela temperatura, logo, dentro de certos limites, é possível aumentar a velocidade de decantação através do aumento da temperatura. Porém, o diâmetro e as densidades são fatores mais importantes. É possível, antes da decantação, realizar uma etapa visando o aumento das partículas.

A digestão e a floculação são dois métodos utilizados com o objetivo de aumentar o tamanho das partículas sólidas antes da decantação, etapa essencial no caso de sistemas coloidais (dispersão onde as partículas do disperso apresentam tamanho médio entre 1 e 100nm, exemplo: gelatina ou amido em água), pois neste estado a decantação é impossível, uma vez que o movimento browniano (movimento aleatório de partículas macroscópicas num líquido como consequência dos choques das moléculas do líquido nas partículas) e a repulsão elétrica entre as partículas anulam a ação da gravidade.

A digestão consiste em deixar a suspensão em repouso até que as partículas finas sejam dissolvidas enquanto as grandes crescem à custa das pequenas, na qual é utilizada no caso de precipitados. Isto ocorre devido a maior solubilidade das partículas menores com relação às maiores.

A floculação consiste em aglomerar as partículas à custa de forças de Van Der Waals (força de atração entre as moléculas), dando origem a flocos de maior tamanho que o das partículas isoladas.

Dois fatores estão relacionados com o grau de floculação de uma suspensão:

1. A probabilidade de haver o choque entre as várias partículas que vão formar o floco, que depende da energia disponível das partículas em suspensão. Portanto, uma agitação branda favorece os choques, aumentando o grau de floculação. Entretanto, a agitação não pode ser intensa devido a possível desagregação dos aglomerados formados;

2. A probabilidade de que, depois da colisão, elas permaneçam aglomeradas.

O uso de agentes floculantes aumenta a probabilidade dos aglomerados recém-formados não se desagregarem espontaneamente, são eles:

Eletrólitos: neutralizam a dupla camada elétrica existente nas partículas sólidas em suspensão, eliminando dessa forma as forças de repulsão que favorecem a dispersão. Assim as partículas podem aglomerar-se, formando flocos de dimensões convenientes. O poder aglomerante do eletrólito é diretamente proporcional a valência dos íons (regra de Hardy-Shulze).

Coagulantes: provocam a formação de precipitados gelatinosos capazes de arrastar consigo, durante a decantação, as partículas finas existentes em suspensão, como por exemplo na clarificação de águas, na qual é muito utilizado sais de alumínio (sulfato de alumínio) e de ferro.

Agentes tensoativos: decantam arrastando consigo os finos de difícil decantação.

Polieletrólitos: são polímeros de cadeias longas com um grande número de pontos ativos nos quais as partículas sólidas se fixam, formando flocos.

A escolha do melhor floculante deve ser feita experimentalmente para cada caso específico.

A separação sólido-líquido através do método de sedimentação gravitacional é aplicada há bastante tempo. Antigamente utilizavam-se recipientes ou poços (processo em batelada) principalmente para a clarificação de líquidos extraídos tais como vinho ou azeite.

O processo em batelada é ainda praticado em indústrias que apresentam um baixo fluxo, porém plantas industriais maiores requerem a implementação de uma operação contínua. A tendência da implementação de processos contínuos começou no final do século 19 quando alguns processos de beneficiamento cresceram rapidamente, como por exemplo, o beneficiamento de minério de ferro e de carvão.

Em tratamento de água, a finalidade da decantação (clarificação) é transformar as impurezas que se encontram em suspensão fina, em estado coloidal ou em solução; bactérias, protozoários e o plâncton, em partículas maiores (flocos) que possam ser removidas por decantação e filtração. A clarificação representa uma parte bastante delicada e importante do tratamento de água e, se ela for falha, pode-se ter problemas bastante sérios nas operações seguintes. Dentre as partículas que se encontram na água provocando turbidez e cor, as que causam maiores dificuldades de remoção são as partículas coloidais.

Atualmente conhecemos como unidades clássicas de tratamento:

Misturadores: unidade onde a água bruta recebe o coagulante. Tem por finalidade proporcionar um movimento turbilhonar, a fim de que ocorra a dispersão da substância química empregada.

Acondicionadores (floculadores): são unidades onde a velocidade da água é diminuída para favorecer a formação do floco, promovendo o contato e a atração do material em suspensão.

Decantadores: após as operações de coagulação e floculação a etapa seguinte é a separação dos sólidos do meio no qual encontram-se suspensos. Isto é conseguido através da decantação e/ou filtração. Estas etapas do processo de clarificação não se constituem como processos independentes, mas sim complementares. A decantação objetiva a separação do material mais denso do que a água, enquanto que a filtração preocupa-se com partículas de densidade próxima a da água.

Filtros: seu objetivo básico é separar as partículas e microorganismos que não tenham ficado retidos no processo de decantação. Por esta razão a eficiência dos filtros depende diretamente do desempenho dos processos anteriores.

As indústrias de alimentos utilizam largamente operações unitárias fundamentadas nas operações físicas entre sólidos particulados e fluidos, como por exemplo:

- Processos de cristalização (separação dos cristais);

- Produção de cerveja: etapa de fabricação do mosto (separação do precipitado protéico e dos componentes do lúpulo não solubilizados do mosto quente);

- Produção de vinho: após a prensagem, o mosto deve ser clarificado por sedimentação, filtração ou centrifugação com o objetivo de remover os sólidos. Na sedimentação o mosto é resfriado a 15°C e deve repousar entre 12 a 48 horas;

- Processo de obtenção de açúcar de cana: A cana é inicialmente lavada, para remover a terra e os detritos, após é picada e esmagada em moendas, na preparação para a remoção do caldo e então, o caldo é extraído pela passagem da cana esmagada através de uma série de moendas. Para macerar a cana e auxiliar a extração, é possível adicionar água ou caldo diluído às moendas.

O caldo é coado para remover impurezas grossas e tratado com cal para coagular parte da matéria coloidal, precipitar certas impurezas e modificar o pH. Além do agente alcalinizante, utilizam-se polieletrólitos, pois em pequenas quantidades (1 ou 2 ppm) melhoram a floculação. Adiciona-se um pouco de ácido fosfórico, pois os caldos que não contêm um pouco de fosfato não são bem clarificados. A mistura é aquecida com vapor de água à alta pressão e decantada em grandes tanques (espessadores contínuos).

Para recuperar o açúcar dos lodos decantados, usam-se filtros a vácuo, a tambor rotatório ou filtro prensa de quadro. O filtrado (caldo clarificado) é evaporado tornando-se um xarope grosso. O xarope resultante é lançado no primeiro estágio de um evaporador a vácuo, onde atinge um determinado grau de supersaturação. Adicionam-se núcleos de açúcar cristal (semeadura) e pela adição de xarope grosso e evaporação controlada, os cristais crescem até o tamanho desejado nesses cristalizadores. A mistura de xarope e cristais (massa cozida) é lançada num cristalizador onde há uma deposição adicional de sacarose sobre os cristais já formados, e a cristalização está completa. Após a massa cozida é centrifugada para a remoção do xarope, esse xarope é reciclado para dar uma ou mais cristalizações. O líquido residual, depois da reciclagem, é conhecido como melaço.

A sedimentação também é uma das principais operações envolvidas no tratamento primário de efluentes, e considerando o volume representativo de água residuária produzido por indústrias, inclusive de alimentos, e a atual preocupação com o ambiente, este tratamento primário deve ser observado com grande importância.

Decantadores para Sólidos Grosseiros

A separação de sólidos grosseiros de uma suspensão é uma operação mais simples de conduzir do que a de partículas finas. Esta separação pode ser realizada em tanques de decantação operando em batelada ou em processo contínuo. As partículas podem ser retiradas pelo

fundo do decantador e o fluido um pouco acima, ou ambos pelo fundo, através de manobras adequadas. Porém, esses equipamentos não permitem a classificação dos sólidos pelo tamanho. Quando isto é necessário, se utilizam decantadores contínuos, cujos modelos mais comuns são:

Decantador de rastelos (Figura 1): a suspensão é alimentada num ponto intermediário de uma calha inclinada. Um conjunto de rastelos arrasta os grossos (decantados facilmente), para a parte superior da calha. Devido à agitação moderada promovida pelos rastelos, os finos permanecem na suspensão que é retirada através de um vertedor que existe na borda inferior da calha.

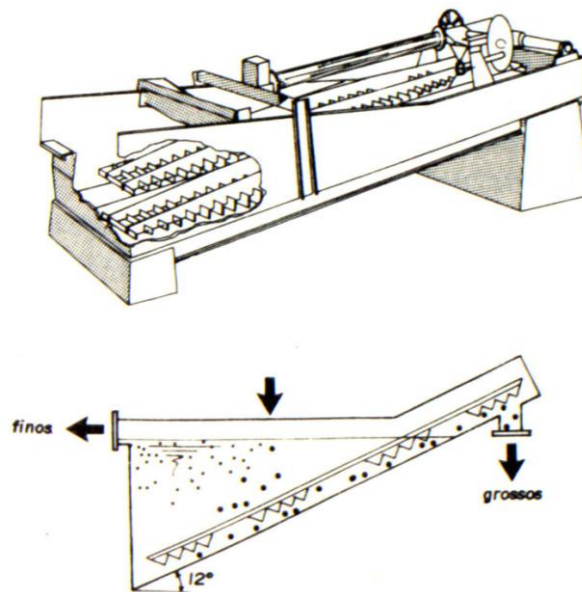


Figura 1. Decantador de rastelos

Decantador helicoidal (figura 2): semelhante ao anterior, onde a suspensão é alimentada num ponto intermediário de uma calha semicircular inclinada. A helicóide arrasta continuamente os grossos para a extremidade superior da calha. O movimento lento promovido pelo mecanismo transportador evita a decantação dos finos, que permanecem na suspensão sendo retirada através de um vertedor.

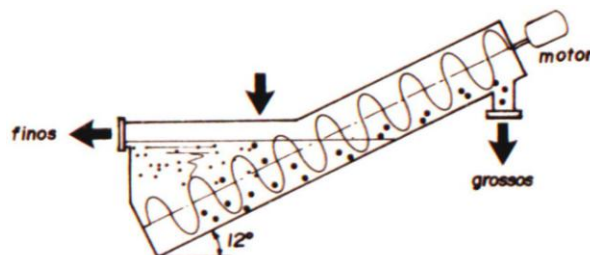


Figura 2. Decantador helicoidal

Ciclone separador: a alimentação é feita tangencialmente na secção superior cilíndrica do ciclone por meio de uma bomba. Os finos saem pela abertura existente na parte superior e os grossos saem pelo fundo da parte cônica inferior, através de uma válvula de controle.

Hidroseparator: o mais conhecido é um tanque cilíndrico com fundo cônico e equipado com rastelos que giram lentamente.

Esses equipamentos funcionam como classificadores ou separadores de primeiro estágio, pois os finos devem ser retirados do líquido em decantadores de segundo estágio.

Decantadores para Sólidos Finos

A decantação de sólidos finos pode ser feita sem interferência mútua das partículas (decantação livre) ou com interferência (decantação retardada). O tipo de decantação, de modo geral, depende da concentração de sólidos na suspensão. A velocidade de decantação pode ser calculada através de correlações empíricas para a decantação retardada e pelas leis de Stokes e Newton. O projeto de decantadores é baseado em ensaios de decantação realizados em laboratório devido ao desconhecimento das verdadeiras características das partículas. O tamanho dos flocos formados não é previsto, sendo difícil até mesmo reproduzir com segurança as condições que conduzem a um determinado tipo de floculação. Nem a densidade das partículas é conhecida com certeza, uma vez que a forma dos flocos é indefinida e a quantidade de água retida é variável. Os ensaios de laboratório são conduzidos de maneira diferente quando se trata de solução diluída ou concentrada, estes permitem a obtenção das curvas de decantação da suspensão.

A sedimentação industrial pode ser operada descontinuamente ou ainda continuamente em equipamentos denominados tanques de decantação ou decantadores (clarificadores ou espessadores). O decantador em batelada (Fig. 3) é um tanque cilíndrico com aberturas para alimentação da suspensão e retirada do produto. O tanque é cheio pela suspensão e fica em repouso, sedimentando. Depois de um período pré-estabelecido, o líquido puro é decantado até que a lama apareça no fluido efluente. A lama é removida através de aberturas no fundo do tanque.

Os decantadores contínuos (Figura 4) são tanques rasos, de grande diâmetro, onde operam grades que giram lentamente e removem a lama. A suspensão é injetada pela parte central do equipamento. Em torno da borda do tanque existem vertedores para a retirada do líquido límpido. As grades (ou rastelos) servem para raspar a lama, conduzindo-a para o centro, por onde é descarregada. O movimento das grades promove uma agitação na camada de lama, favorecendo a floculação e a remoção da água retida na lama. Os rastelos giram à razão de 1 rotação a cada 5 a 30 minutos.

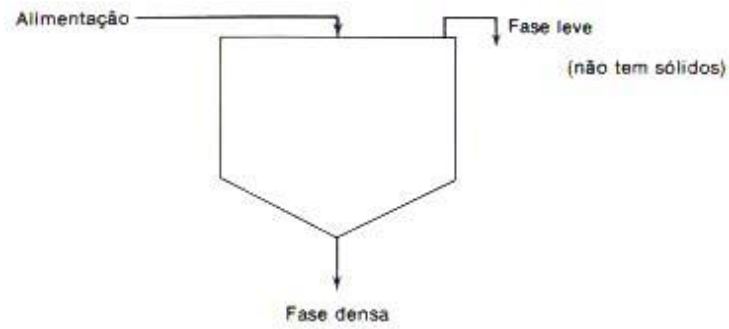


Figura 3. Esboço de um tanque de decantação

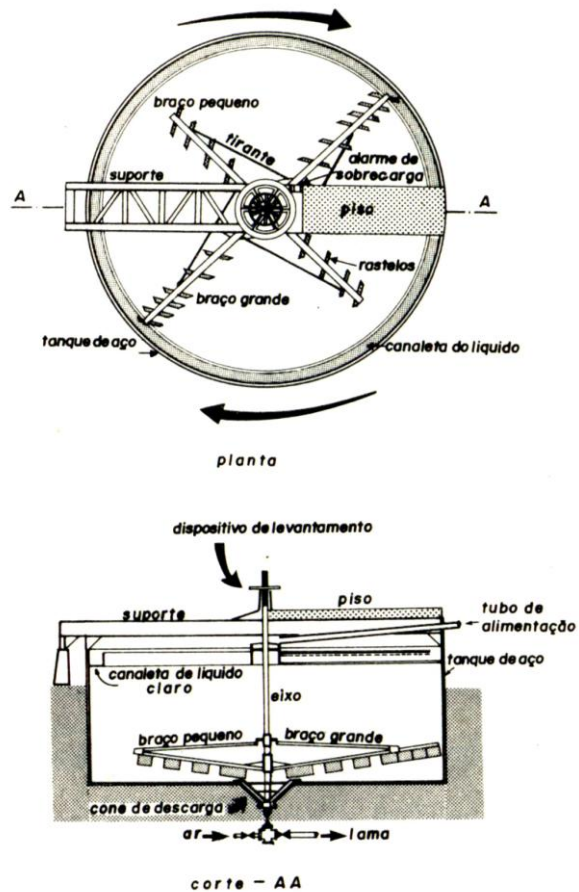


Figura 4. Esboço de um decantador contínuo.

A capacidade de um decantador depende da área de decantação. Quando áreas muito grandes são necessárias utilizam-se bacias de decantação que ficam diretamente no terreno ou decantadores de bandejas múltiplas (Fig. 5). Cada bandeja é ligeiramente inclinada e munida de rasteiros presos ao eixo central.

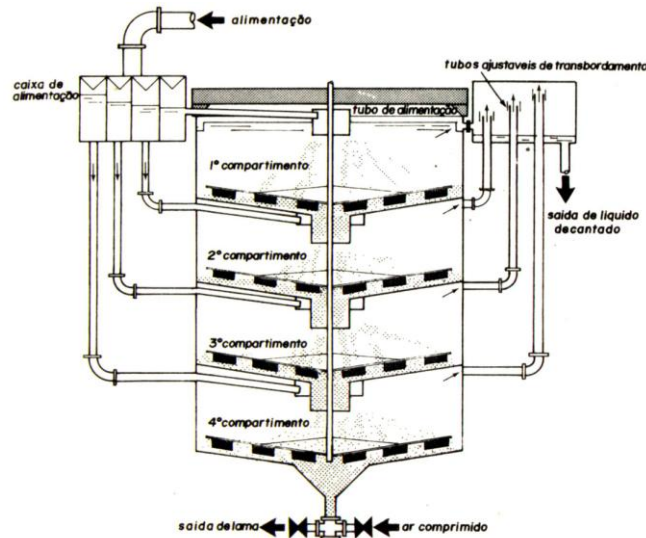


Figura 5. Decantador de bandejas múltiplas.

Dimensionamento de Clarificadores

O projeto de decantadores se baseia na curva de decantação, que é obtida através de um ensaio de decantação com uma amostra da suspensão diluída a ser clarificada. Se uma amostra previamente homogeneizada da suspensão for colocada num tubo de vidro graduado de seção constante (proveta) e deixada em repouso, verifica-se que, depois de um certo tempo, as partículas mais grossas depositam-se no fundo do tubo e as mais finas continuam em suspensão. As partículas intermediárias ficam distribuídas em diversas alturas de acordo com a sua granulometria. Ou seja, existe uma classificação espontânea das partículas ao longo da proveta. Cada partícula decanta com velocidade proporcional ao seu tamanho e a clarificação vai progredindo, mas não há uma linha nítida de separação entre a suspensão e o líquido clarificado. A única separação nítida é entre o sedimento sólido depositado no fundo e o resto da suspensão. Este comportamento é típico das suspensões diluídas.

A área de decantação (S) é obtida a partir de dados experimentais podendo ser calculada pela equação abaixo:

$$S = \frac{Q_A}{u}$$

Onde:

Q_A = vazão volumétrica da suspensão alimentada (m^3/h)

u = velocidade de decantação (m/h)

Deve-se usar um coeficiente de segurança de 100% ou mais para atender uma série de fatores imprevisíveis, como: escoamentos preferenciais, diferenças locais de temperatura que causam turbulência e conseqüentemente reciclagem dos sólidos, os distúrbios causados por variações bruscas das condições de operação (alimentação ou retirada de lama ou o escorregamento de grandes massas de lama) e algumas vezes até mesmo reações químicas e pequenas explosões decorrentes da decomposição de compostos.

A partir da curva de decantação (Figura 6) se obtém a velocidade de decantação. Durante o ensaio de decantação se mede a altura (Z) da interface do líquido límpido no recipiente graduado em diversos instantes e traça-se a curva Z versus θ .

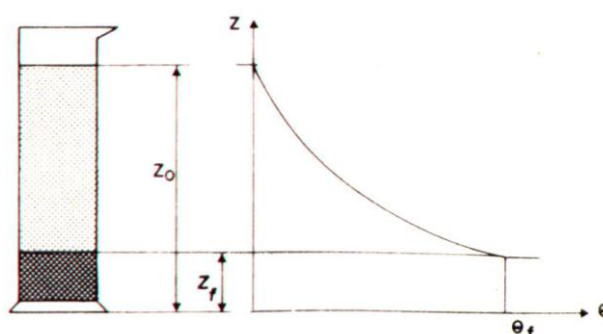


Figura 6. Ensaio de decantação

No instante θ a altura dos sólidos depositados é Z . Depois de certo tempo θ_f , a turbidez da suspensão será bastante pequena podendo considerar terminada a clarificação. A altura dos sólidos depositados até esse instante será Z_f e a velocidade de decantação pode ser obtida pela equação abaixo:

$$u = \frac{Z_0 - Z_f}{\theta_f}$$

Onde:

Z = altura da interface do sólido - suspensão no instante θ a partir do início da decantação

Z_0 = altura inicial da suspensão na proveta

Z_f = altura dos sólidos depositados no fundo do recipiente após o término da decantação

θ_f = tempo no final da decantação

O emprego de floculantes provoca o aumento da velocidade, conduzindo a menores áreas de decantação e, ainda, pode aumentar a

capacidade de um decantador existente, pois o uso faz com que um menor espessamento da lama final seja obtido, além de melhorar a clarificação do líquido. Porém, o uso de algum agente floculante encarece a operação. A decisão da utilização ou não de um floculante só pode ser feita através de um balanço econômico devido ao maior custo operacional proporcionado pelo floculante.

Dimensionamento de Espessadores

Durante um ensaio de decantação utilizando uma suspensão concentrada (superior a 50g/l) mede-se a altura Z da superfície de separação entre o líquido clarificado e a suspensão. Quando a decantação tem início, a suspensão encontra-se a uma altura Z_0 e sua concentração é uniforme C_0 , como mostra a Fig. 7.

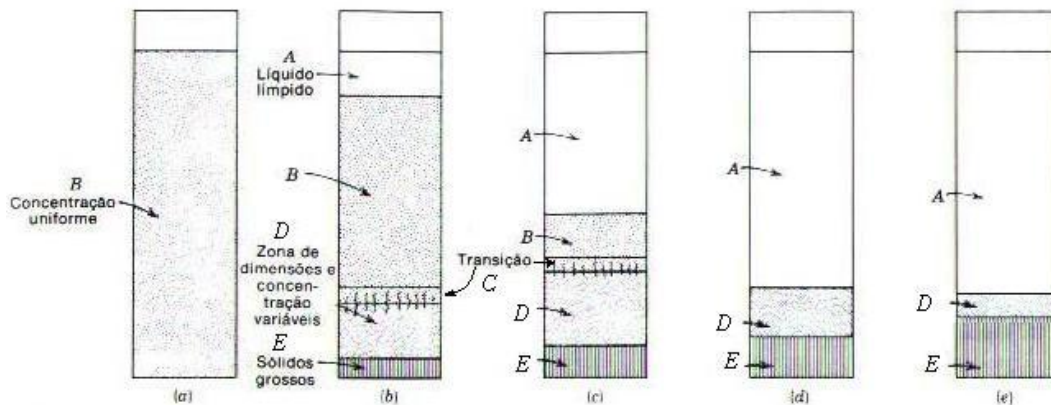


Figura 7. Decantações de suspensões concentradas.

Pouco tempo depois é possível distinguir cinco zonas distintas na proveta.

A- Líquido clarificado: no caso de suspensões que decantam muito rápido esta camada pode ficar turva durante certo tempo por causa das partículas finas que permanecem na suspensão.

B- Suspensão com a mesma concentração inicial C_0 : a linha que divide A e B é geralmente nítida.

C- Zona de transição: a concentração da suspensão aumenta gradativamente de cima para baixo nesta zona, variando entre o valor inicial C_0 até a concentração da suspensão espessada. A interface BC é, de modo geral, nítida.

D- Suspensão espessada na zona de compressão: é a suspensão onde os sólidos decantados sob a forma de flocos se encontram dispostos uns sobre os outros, sem atingirem a máxima compactação, uma vez que ainda existe líquido entre os flocos. A separação entre as zonas C e D geralmente não é nítida e apresenta diversos canais através dos quais o

líquido proveniente da zona em compressão escoar. A espessura desta zona vai aumentando durante a operação.

E- Sólido grosseiro: foram sólidos que decantaram logo no início do ensaio. A espessura desta zona praticamente não varia durante o ensaio.

A Figura 7 mostra a evolução da decantação com o tempo. As zonas A e D tornam-se mais importantes, enquanto a zona B diminuiu e C e E permaneceram inalteradas. Ao final do processo B e C desapareceram, ficando apenas o líquido clarificado, a suspensão em compressão e o sedimento grosso. Este é também chamado ponto de compressão.

A zona A aumenta enquanto que a zona D diminui lentamente até a superfície de separação das camadas A e D atingir o valor Z_f . Este valor mínimo não corresponde necessariamente à concentração máxima da suspensão decantada, pois é possível, com agitação apropriada, reduzir ainda mais a altura da lama espessada.

Na Figura 8 é mostrado um gráfico dos níveis das superfícies de separação das camadas A e B e C e B em função do tempo. Pode-se observar que, a velocidade de decantação é constante na zona de decantação (II) e decresce na zona de compressão.

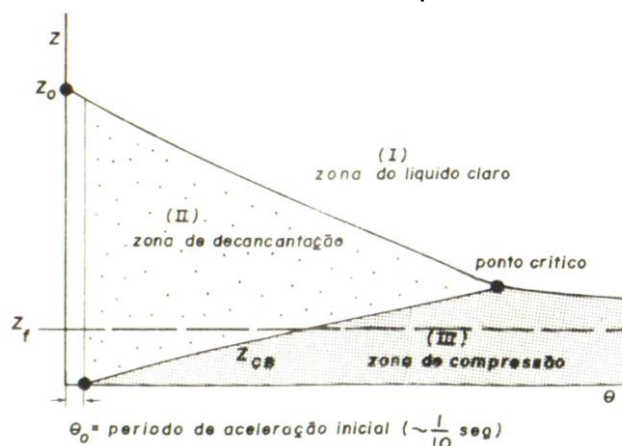


Figura 8. Níveis de separação das camadas
Observa-se, também, no gráfico três zonas distintas:

- I - líquido claro A;
- II - zona de decantação B;
- III - zona de compressão.

Em uma operação descontínua de decantação, conforme foi mostrado, as alturas das várias zonas variam com o tempo. Em um equipamento que opera continuamente, as mesmas zonas estão presentes. No entanto, uma vez atingido o regime permanente (quando a suspensão da alimentação é injetada a uma taxa igual à taxa de remoção da lama e do líquido límpido do decantador), as alturas de cada zona serão constantes. A figura 9 mostra a disposição das diferentes zonas em um decantador.



Figura 9. Disposição das zonas em um decantador

O dimensionamento de espessadores pode ser feito por diversos métodos: Coe e Clevenger; Kynch; Roberts e Talmadge e Fitch.

Método de Coe e Clevenger

Neste método, que é a base dos demais, considera-se que a área de um espessador contínuo deve ser suficiente para permitir a decantação de todas as partículas alimentadas, através das diversas zonas do espessador em funcionamento normal. Se a área for insuficiente começará havendo acúmulo de sólidos em uma dada seção do espessador e finalmente haverá partículas sólidas arrastadas no líquido clarificado. Esta seção ou zona que constitui o "gargalo" da operação será denominada zona limite (Figura 10).

Para o dimensionamento são realizadas as seguintes considerações:

1- A velocidade de decantação dos sólidos em cada zona é função da concentração local da suspensão: $u = f(C)$

2- As características essenciais do sólido obtido durante ensaios de decantação descontínuos não se alteram quando se passa para o equipamento de larga escala. Nem sempre é verdadeira essa consideração. O grau de floculação, por exemplo, pode variar porque as condições em que é realizada a decantação durante o ensaio são diferentes das de operação normal. Mesmo não havendo floculação, a digestão do precipitado pode não ocorrer na mesma proporção nos dois casos.

As velocidades de decantação em suspensões de diversas concentrações são determinadas em experimentos isolados. Determina-se a velocidade inicial de decantação para uma dada suspensão com uma concentração inicial de sólidos e depois diluí-se essa suspensão com água e novamente determina-se a velocidade de decantação. Repete-se até que se tenham dados suficientes para ter uma relação funcional entre a velocidade e a concentração. A partir dessa relação, calcula-se a área S do decantador para várias concentrações. O valor máximo encontrado será a

área necessária para permitir a decantação em regime permanente de todo o sólido alimentado ao decantador. Deve-se adotar um coeficiente de segurança, que pode exceder 100%.

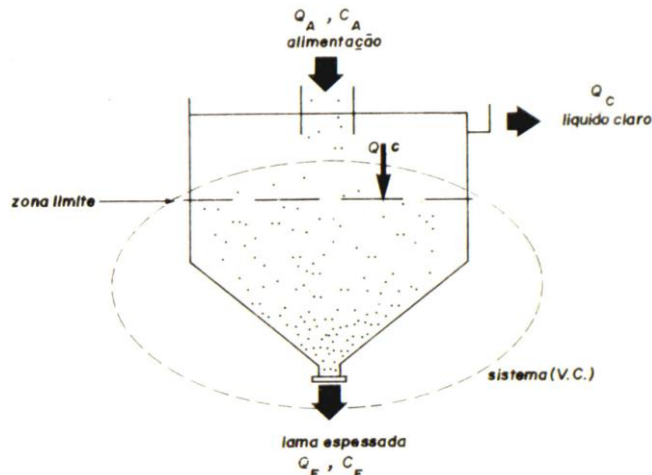


Figura 10. Indicação da zona limite em um decantador

Sendo:

Q_A = vazão volumétrica da suspensão alimentada ao decantador (m^3/h)

C_A = concentração de sólidos na suspensão alimentada (t/m^3)

Q_C = vazão volumétrica de líquido clarificado (m^3/h)

C_C = concentração do líquido clarificado (t/m^3)

Q_E = vazão volumétrica de lama espessada (m^3/h)

C_E = concentração da lama espessada (t/m^3)

Q = vazão volumétrica da suspensão na zona limite (m^3/h)

C = concentração na zona limite (t/m^3)

Para que não haja arraste de partículas sólidas na direção do vertedor de líquido clarificado:

$$u_{\text{ascensão líquido}} < u_{\text{decantação partículas}}$$

Não havendo arraste de partículas para cima, todo o sólido que chega à zona limite sairá necessariamente pelo fundo do decantador quando este opera em regime permanente. Assim, a diferença entre as vazões Q e Q_E será a vazão volumétrica de líquido que sobe pelo decantador nessa seção:

$$Q_C = Q - Q_E$$

E essa diferença dividida pela área do decantador S será a velocidade ascensional do líquido na seção. Esta velocidade deverá ser menor que a velocidade u de decantação nessa zona. A condição limite pode ser expressa:

$$u = \frac{Q - Q_E}{S}$$

Logo,

$$S = \frac{Q - Q_E}{u}$$

Balancos materiais do sólido no decantador e no sistema indicado estão expressos abaixo.

Considerando:

- Regime permanente;
- Não há arraste de sólidos

$$Q_A C_A = Q C = Q_E C_E$$

Então:

$$Q = \frac{Q_A C_A}{C} \quad \text{e} \quad Q_E = \frac{Q_A C_A}{C_E}$$

Para determinar a área do decantador em função da vazão da suspensão alimentada utiliza-se a equação abaixo:

$$S = \frac{Q_A C_A \left(\frac{1}{C} - \frac{1}{C_E} \right)}{u}$$

nde:

S = área de decantação = seção transversal do decantador (m^2)

u = velocidade de decantação na zona limite (m/h)

Q_A = vazão volumétrica da suspensão alimentada ao decantador (m^3/h)

C_A = concentração de sólidos na suspensão alimentada (t/m^3)

C_E = concentração da lama espessada (t/m^3)

C = concentração da suspensão na zona limite (t/m^3)

A partir dos resultados experimentais de C e u são realizados diversos cálculos para determinar os valores de S , sendo que o maior valor encontrado será a área mínima requerida para a decantação.

Método de Kynch

Kynch desenvolveu um método de dimensionamento de decantadores que requer apenas um ensaio que forneça a curva de decantação (Z versus θ) mostrada na Figura 11. Tanto C como u podem ser tirados diretamente da curva. Traçam-se tangentes em diversos

pontos da curva e determinam-se os valores de θ , Z e Z_i . Abaixo estão as equações para o cálculo da velocidade (u) e da concentração (C):

$$u = \frac{Z_i - Z}{\theta}$$

$$C = \frac{C_0 Z_0}{Z_i}$$

Onde:

C_0 = concentração inicial da suspensão (t/m^3)

Z_0 = altura inicial da suspensão (m)

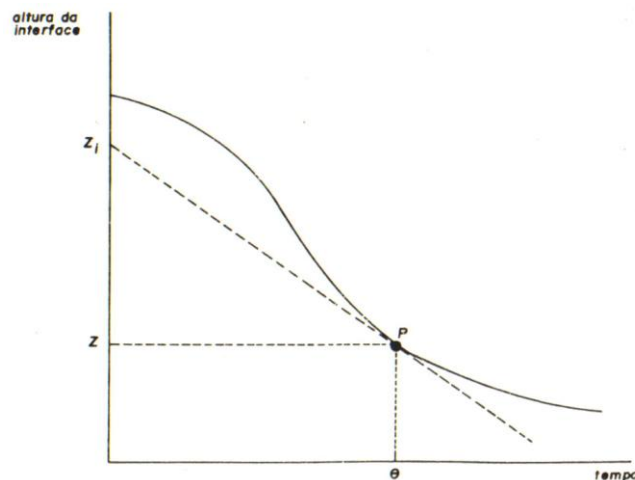


Figura 11. Determinação gráfica de u e C pelo método de Kynch

Com a construção gráfica descrita calculam-se os diversos pares de valores da concentração e da velocidade de decantação, com os quais são calculados os valores correspondentes da seção transversal.

$$S = \frac{Q_A C_A \left(\frac{1}{C} - \frac{1}{C_E} \right)}{u}$$

O valor máximo obtido corresponde a área mínima que o decantador.

Método de Roberts

Este é um método gráfico que permite localizar com exatidão o ponto crítico (início da zona de compressão), que às vezes é difícil de determinar pelo método anterior. Com os dados do ensaio de decantação traça-se um gráfico de $Z - Z_f$ versus θ em papel mono-log (Figura 12). A curva obtida mostra uma descontinuidade no ponto crítico, o que permite

determinar θ_c com precisão. Conhecido este valor, calcula-se diretamente a área mínima com a seguinte equação:

$$S_{\min} = \frac{Q_A C_A \left(\frac{1}{C_C} - \frac{1}{C_E} \right)}{u_C}$$

Onde:

$$C_C = \frac{C_0 Z_0}{Z_{ic}}$$

$$u_C = \frac{Z_{ic} - Z_C}{\theta_C}$$

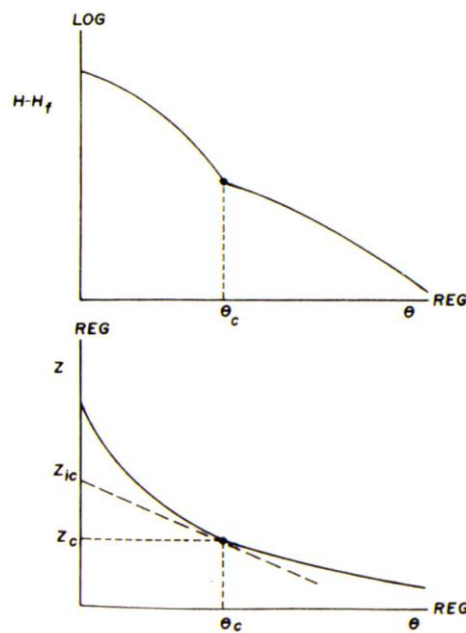


Figura 12. Construção gráfica do método de Roberts

Método de Talmadge e Fitch

Este método gráfico permite calcular diretamente a área mínima do espessador quando se conhece o ponto de compressão (P_C) na curva de decantação (Figura 13). Uma construção gráfica muito simples fornece diretamente θ_E pelo cruzamento da tangente no ponto P_C com a horizontal $Z = Z_E$, onde Z_E é a altura da interface correspondente à concentração C_E especificada para a lama espessada.

A área mínima pode ser calculada a partir das equações utilizadas anteriormente:

$$S_{\min} = \frac{Q_A C_A \left(\frac{1}{C_C} - \frac{1}{C_E} \right)}{u_C}$$

$$C_C = \frac{C_0 Z_0}{Z_{ic}}$$

$$u_C = \frac{Z_{ic} - Z_E}{\theta_E}$$

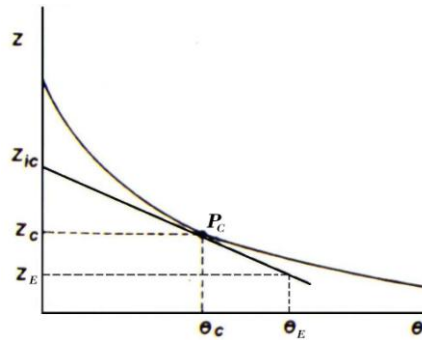


Figura 13. Construção gráfica de Talmadge e Fitch

Substituindo as equações acima na expressão para o cálculo da área se tem:

$$S_{\min} = \frac{Q_A C_A \left(\frac{Z_{ic}}{C_0 Z_0} - \frac{1}{C_E} \right)}{\frac{Z_{ic} - Z_E}{\theta_E}} = \frac{Q_A C_A}{C_0 Z_0} \left(Z_{ic} - \frac{C_0 Z_0}{C_E} \right) \frac{\theta_E}{Z_{ic} - Z_E}$$

Como:

$$Z_E = \frac{C_0 Z_0}{C_E}$$

$$S_{\min} = \frac{Q_A C_A \theta_E}{C_0 Z_0} \left(\frac{Z_{ic} - \frac{C_0 Z_0}{C_E}}{Z_{ic} - \frac{C_0 Z_0}{C_E}} \right)$$

A área mínima será:

$$S_{\min} = \frac{Q_A C_A \theta_E}{C_0 Z_0}$$

Dimensionamento da Profundidade do Sedimentador

A concentração da lama espessada que se pode obter numa dada operação não é função da área do espessador, mas do tempo de residência dos sólidos na zona de compressão. Para determinar o volume da zona de compressão são considerados os seguintes parâmetros:

Vazão mássica do sólido : $Q_A \cdot C_A$, (t/h)

Vazão volumétrica de sólido : $Q_A \cdot C_A / \rho_S$ (m^3/h)

Tempo de residência do sólido na zona de compressão : $t_E - t_C$

Então, o volume de sólido na zona de compressão V_S é dado por :

$$V_S = \frac{Q_A \cdot C_A}{\rho_S} \cdot (t_E - t_C)$$

considerando:

V : Volume da suspensão de densidade média (ρ_m)

V_S : Volume do sólido

$$V \cdot \rho_m = V_S \cdot \rho_S + (V - V_S) \cdot \rho$$

$$V = V_S \cdot \frac{\rho_S - \rho}{\rho_m - \rho}$$

Considerando o volume dos sólidos V_S e substituindo-o na expressão acima temos que:

$$V = \frac{Q_A \cdot C_A}{\rho_S} \cdot (t_E - t_C) \cdot \frac{\rho_S - \rho}{\rho_m - \rho}$$

Este é o volume mínimo que o sedimentador deverá ter para espessar a lama até a concentração C_E :

Logo a profundidade do sedimentador (H) pode ser calculada pela relação:

$$H = V / S$$

$$H = \frac{Q_A \cdot C_A}{S \cdot \rho_S} \cdot (t_E - t_C) \cdot \frac{\rho_S - \rho}{\rho_m - \rho}$$

Exemplo 01: Uma suspensão aquosa foi submetida a uma série de ensaios de decantação e foram obtidos os seguintes resultados :

C g/L	265	285	325	415	465	550
u (cm/h)	10	8	6	3	2	1

Deseja-se calcular o diâmetro de um decantador com capacidade de processar uma vazão mássica de sólidos de 8 ton/h de uma suspensão contendo 236 Kg / m^3 . A lama deverá conter 550 Kg m^3 de sólidos.

Resolução : Considerando o método de Coe e Clevenger temos que:

$$S = \frac{Q_A C_A \left(\frac{1}{C} - \frac{1}{C_E} \right)}{u}$$

$$Q_A \cdot C_A = 8 \text{ ton / h}$$

$$C_E = 550 \text{ Kg / m}^3$$

$$C_A = 236 \text{ Kg / m}^3 = 0,236 \text{ t/m}^3$$

Podemos então calcular a área para cada um dos ensaios como mostrado na tabela a seguir.

C t/m ³	0,265	0,285	0,325	0,415	0,465	0,55
u (m/h)	0,1	0,08	0,06	0,03	0,02	0,01
S (m ²)	156,4	169,1	167,8	157,7	132,9	0

Ajustando os dados obtidos uma equação de segunda ordem para determinar a área máxima e considerando os resultados mostrados na tabela acima temos:

$$S(\text{m}^2) = -0,0023 \cdot C^2 (\text{g/L}) + 1,5542 \cdot C(\text{g/L}) - 91,203$$

Fazendo $dS/dC=0$; determinamos a área máxima. Esta área é 171,35 m² e corresponde a um diâmetro (D) de 14,77 m caso utilizarmos o coeficiente de segurança de 100% teremos D= 20,9 m.

Referências Bibliográficas

FOUST, A. S. et.al. (1982). "Princípios das Operações Unitárias" – Ed LTC, Rio de Janeiro – RJ, 2ª edição.

GEANKOPLIS, C. J. (1993). "Transport Processes and Unit Operations" – Ed Allyn and Bacon, London.

GOMIDE, R. (1980). "Operações Unitárias", vol. 3 – Ed do Autor, São Paulo.

LIMA, Rosa Malena Fernandes and LUZ, José Aurélio Medeiros da. Análise granulométrica por técnicas que se baseiam na sedimentação gravitacional: Lei de Stokes. *Rem: Rev. Esc. Minas*, Apr./June 2001, vol.54, no.2, p.155-159. ISSN 0370-4467.

PAYNE, J. H. (1989). "Operações Unitárias na Produção de Açúcar de Cana" – Ed. Nobel: STAB, São Paulo.

SHREVE, R. N.; BRINK Jr, J. A. (1980) "Indústrias de Processos Químicos" – Ed. Guanabara Dois S.A., Rio de Janeiro – RJ, 4ª edição.

<http://www.nzifst.org.nz/unitoperations/>

<http://www.solidliquid-separation.com/index.htm>

http://www.quimicafacil.pop.com.br/op_unitarias/apostilas/decantacao.doc

<http://www.unicer.pt/noticias/main.php?tipo=1>

<http://www.fec.unicamp.br/~bdta/guarau.html>