

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS
Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais

MONOGRAFIA

Espessamento de Polpas

Aluno: Patrícia Andrade Sousa

Orientador: Prof. George Eduardo Sales Valadão

Abril 2012

DEDICATÓRIA

Dedico essa monografia:

*Primeiramente a Deus, que me deu força para chegar até aqui;
Ao meu esposo Atair, minhas filhas Bruna, Verônica, Ester, por me apoiarem sempre e
por nunca terem me abandonado nos momentos difíceis; aos professores da área de
Tratamento de Minério da Escola de Engenharia de Minas UFMG.*

AGRADECIMENTOS

- Ao Prof. George Eduardo Sales Valadão, meu orientador, pela sua atenção durante a preparação do trabalho.
- Aos colegas de trabalho pelo incentivo.
- Aos membros da Banca Examinadora, pela leitura do texto e pelas sugestões oferecidas ao trabalho.
- Aos amigos e amigas que não foram citados e que sempre estiveram comigo me auxiliando.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	01
2. OBJETIVO.....	02
3. DESENVOLVIMENTO.....	03
3.1 Espessamento.....	03
3.2 Fatores que afetam o espessamento.....	04
3.2.1 Tamanho e forma da partícula.....	04
3.2.2 Porcentagem de sólido.....	06
3.2.3 Característica de superfície.....	06
3.2.4 Viscosidade do fluido.....	06
3.3 Sedimentação.....	06
3.4 Coagulante e Floculante.....	09
3.4.1 Floculantes.....	10
3.4.2 Coagulantes.....	12
3.5 Classificação dos sedimentadores.....	15
3.5.1 Divisão dos sedimentadores quanto ao regime de funcionamento 15	
3.5.1.1 Descontínuos.....	15
3.5.1.2 Contínuos.....	15
3.5.2 Classificação dos sedimentadores quanto a sua finalidade.....	15
3.5.2.1 Clarificadores.....	15
3.5.2.2 Espessadores.....	16
3.6 Tipos de Espessadores.....	16
3.6.1 Espessador Contínuo Convencional.....	18
3.6.2 Espessador de Alta Capacidade.....	22
3.6.3 Espessador de Lamelas.....	23
3.6.4 Espessador com Alimentação Submersa.....	24
3.6.5 Modelos de Espessadores de Alta Capacidade.....	25
3.6.5.1 Espessador Ultrasep.....	25
3.6.5.2 Espessador de Pasta.....	26
3.6.5.3 Espessador de Alta Escala.....	27
3.6.5.4 Espessador de Alta Densidade.....	28

3.6.6	Diferentes tipos de modelos de Espessadores de Lamelas.....	30
3.6.6.1	Modelo LT.....	30
3.6.6.2	Modelo LTS.....	30
3.6.6.3	Modelo LTK.....	31
3.7	Dimensionamento de Espessadores.....	31
3.7.1	Método de Coe e Clevenger.....	33
3.7.2	Método de Kynch.....	36
3.7.3	Método de Roberts.....	37
3.7.4	Método de Talmadge e Fich.....	39
3.8	Dimensionamento da Profundidade do Sedimentador.....	40
3.9	Processos para melhoria do desempenho dos espessadores.....	41
3.9.1	Distribuição uniforme da alimentação.....	42
3.9.2	Diluição otimizada da alimentação.....	43
3.9.3	Custo minimizado de floculantes.....	43
3.10	Espessadores aprimorados.....	45
4.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	47
5.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	48

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 3.1. Etapas de teste de proveta e regiões formadas durante a sedimentação..	07
FIGURA 3.2 Esquema de diferentes tipos de aglomeração.....	12
FIGURA 3.3 Esquema de aproximação de duas partículas	13
FIGURA 3.4: Esquema de diferentes tipos de rastelos.....	17
FIGURA 3.5: Diagrama ilustrativo de um Espessador Contínuo Convencional.....	19
FIGURA 3.6: Representação <i>Feedwheel</i>	20
FIGURA 3.7: Alimentador de um Espessador de Alta Capacidade.....	21
FIGURA 3.8: Espessador de Lamelas.....	23
FIGURA 3.9: Diagrama ilustrativo de um Espessador Contínuo de Alta Capacidade com alimentação submersa.....	24
FIGURA 3.10: Espessador de Alta capacidade Ultrasep.....	25
FIGURA 3.11: Espessador de Pasta Republica Dominicana DELKOR.....	26
FIGURA 3.12: Espessador de Alta Escala, Cerro Verde, Peru.....	27
FIGURA 3.13: Espessador de Alta Escala, Escondida, Chile.....	27
FIGURA 3.14: Espessador de Alta Densidade.....	29
FIGURA 3.15: Modelo LT de espessador de Lamelas.....	30
FIGURA 3.16: Modelo LTS de espessador de Lamelas.....	30
FIGURA 3.17: Modelo LTK de espessador de Lamelas.....	31
FIGURA 3.18: Curva Altura x Tempo (Coe e Clevenger).....	32
FIGURA 3.19: Método de Tubo Longo.....	32
FIGURA 3.20: Indicação da zona limite em um decantador.....	33
FIGURA 3.21 Determinação gráfica de u e C pelo Método de Kyunch.....	37
FIGURA 3.22: Construção gráfica do Método de Roberts.....	38
FIGURA 3.23: Construção gráfica de Talmadge e Fitch.....	39
FIGURA 3.24: Figura representando a distribuição uniforme na área de sedimentação com o poço de alimentação EvenFlo.....	42
FIGURA 3.25: Curto-circuito na área de sedimentação com um poço de alimentação mal projetado.....	42
FIGURA 3.26: Figura representando um curto circuito (WESTECH).....	43
FIGURA 3.27: Figura representando análise fluidodinâmica não uniforme (WESTECH).....	44
FIGURA 3.28: Representação de um poço de alimentação EvenFlo (WESTECH).....	44

FIGURA 3.29: Figura representando análise fluidodinâmica computacional uniforme (WESTECH).....	45
FIGURA 3.30: Representação de um poço de alimentação EvenFlo com diluição AirLift (WESTECH).....	46

LISTA DE TABELAS:

TABELA 3.1: Caracterização de floculantes orgânicos.....	10
TABELA 3.2: Principais características de alguns floculantes e coagulantes mais utilizados.....	13
TABELA 3.3: Tipos de Espessadores para adensamento de polpas de minério de ferro.....	20

RESUMO

Espessamento é uma operação de separação de sólidos suspensos em um meio fluido através da sedimentação de partículas sólidas.

As operações de espessamento ocorrem pela necessidade da recuperação de água e para ajustes na densidade de polpa, visando às operações subsequentes.

Os equipamentos que realizam estas operações são geralmente tanques de formatos cilíndrico-cônicos, onde a alimentação é introduzida pelo centro e retira-se uma polpa adensada através do fundo do tanque. O líquido clarificado é retirado em uma calha que circunda o tanque.

Este trabalho apresenta vários modelos de espessadores e descreve algumas técnicas utilizadas para o dimensionamento destes equipamentos.

Palavras-chave: separação sólido-líquido, espessamento, dimensionamento.

Abstract

Thickening is an operation of suspended solids separation in a fluid medium by means of sedimentation of solid particles.

The thickening operations occur by the necessity of recovering water and adjusting the density of pulp aiming the subsequent operations.

The equipment performing these operations are generally cylindrical-conical tanks, where the feed is introduced in the center and a dense pulp is removed through the tank bottom. The clarified liquid is drawn into a flume that is surrounding the tank.

This work presents several models of thickeners and describes some techniques used for sizing these equipments.

Keywords: solid-liquid separation, thickening, scaling.

1. INTRODUÇÃO

O espessamento é uma operação de separação sólido-líquido que tem finalidade de separar sólidos suspensos em meio líquido, pela ação da gravidade.

A separação sólido-líquido é uma das etapas do beneficiamento de minério que visa :

- Recuperação de água para ser utilizada novamente no processo;
- Adequar a porcentagem de sólidos para etapas subsequentes;
- Redução da umidade dos produtos para transporte e comercialização;
- Preparação de rejeitos visando transporte e disposição.

Alguns tipos de equipamentos que realizam esta operação são chamados espessadores. Os espessadores são tanques abertos de formato cilíndrico, com entrada da suspensão na parte superior central, de fundo ligeiramente cônico para a retirada de polpa espessa e calha circulando o topo para descarga do líquido clarificado.

O espessamento é bastante empregado industrialmente em processos contínuos no adensamento de polpas e minérios, em unidades com reação de precipitação e no tratamento de efluentes, dentre outros.

Na indústria mineral, os sedimentadores mais utilizados produzem polpas com percentagens de sólidos elevadas, visando a sua disposição em barragens, cavas de minas ou galerias de minas subterrâneas.

A grande utilização destes equipamentos desperta um interesse de pesquisa no estudo do dimensionamento e otimização, com o objetivo de melhorar a eficiência nos processos produtivos minimizando os custos operacionais.

Tanto o dimensionamento quanto a otimização, tem como base os dados gerados nos ensaios de bancada que visam mostrar o comportamento do sólido existente na suspensão durante o processo de sedimentação.

2. OBJETIVO:

- Rever conceitos básicos sobre espessamento;
- Rever as principais variáveis no espessamento;
- Citar os tipos de espessadores;
- Rever o dimensionamento de espessadores;
- Rever os processos para melhoria do desempenho dos espessadores.

3. DESENVOLVIMENTO

3.1 Espessamento

Espessadores são tanques de sedimentação empregados em um tipo particular de separação sólido-líquido, separação esta que é denominada de espessamento.

Espessamento é a separação de uma suspensão de sólido para obter uma fase mais densa e uma fase líquida clarificada. A função desempenhada pelos espessadores é a de receber uma polpa diluída e gerar um produto (*underflow*) que exibe maior concentração de sólidos que a alimentação. Um segundo produto, (*overflow*), exibe concentração de sólidos bem menor que aquela apresentada pela alimentação.

O espessamento é empregado nas indústrias química, têxtil, farmacêutica, no beneficiamento de minérios, processamento de alimentos, tratamento de água e resíduos.

Esta operação é largamente empregada nas usinas de beneficiamento de minério, com as seguintes finalidades principais:

- Espessamento das lamas (muito diluídas) na recuperação de água para recirculação (*overflow*) e adensamento da polpa (*underflow*) para transporte e descarte;
- Espessamento de concentrados para adequação da concentração de sólidos para a etapa seguinte de filtração;
- Espessamento de materiais ainda não concentrados para a adequação do percentual de sólidos para a etapa seguinte de concentração por flotação (mais comum) ou concentração magnética.

Novas aplicações podem ser vislumbradas, como:

- Maior adensamento das lamas (espessadores High Density) ou geração de pasta mineral (espessadores Deep Cone) para descarte;
- Espessamento de rejeitos de flotação, tendo em vista a eliminação das espumas (para melhorar a condição de bombeamento) ou a adequação da concentração de

sólidos para a filtragem do material permitindo o seu descarte por empilhamento.

3.2 Fatores que afetam o espessamento

A eficiência de um espessador é dada pela razão de seu espessamento expressa pela unidade de sólidos espessados por área por tempo e pela quantidade de sólidos no *overflow* e no *underflow*.

Vários fatores podem influenciar no projeto de um espessador como:

- Tamanho e Forma de Partícula;
- Porcentagem de sólido na polpa;
- Característica da superfície;
- Viscosidade do líquido.

3.2.1 Tamanho e forma da partícula

A faixa granulométrica influencia nos custos e desempenho nas operações. A forma da partícula influencia na velocidade de sedimentação. Partículas 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 (França, 2007).

A lei de Stokes ilustra a influencia da distribuição granulométrica. Esta lei permite calcular a velocidade terminal quando as forças da gravidade e resistência do fluido se tornam iguais e a partícula passa a ter uma queda com velocidade constante, pode ser determinada:

$$V_t = \frac{(\rho_s - \rho) g D^2}{18 \mu} \dots\dots\dots(3.1)$$

V_t=velocidade terminal da partícula, m/s ;

ρ_s= densidade do sólido, kg/m³;

ρ = densidade do liquido, kg/m^3 ;

g = aceleração da gravidade, m/s^2 ;

D = diâmetro da partícula, m.

μ = viscosidade do fluido, $\text{kg/m} \times \text{s}$.

A equação de Stokes tem algumas limitações: assume um regime laminar e partículas esféricas de raio menor que $50 \mu\text{m}$.

A velocidade terminal é diretamente proporcional ao quadrado de seu tamanho, logo partículas de tamanhos menores irão ter uma velocidade terminal muito menor comparada aquela de tamanho maior.

Quando se tem partículas grosseiras, maiores que 5 mm , o regime passa a ser turbulento e para altas velocidades de queda a principal resistência é atribuída à perturbação do fluido.

A velocidade terminal é dada pela seguinte expressão:

$$V_t = \sqrt{\left[\frac{(3gD(\rho_s - \rho))}{\rho} \right]} \dots\dots\dots(3.2)$$

V_t =velocidade terminal da partícula , m/s ;

ρ_s = densidade do solido, kg/m^3 ;

ρ = densidade do liquido, kg/m^3 ;

g = aceleração da gravidade, m/s^2 ;

D = diâmetro da partícula, m.

Para queda impedida a velocidade terminal é dada por:

$$V = K \sqrt{D(\rho_s - \rho)} \dots\dots\dots(3.3)$$

V = velocidade terminal da partícula , m/s ;

K = constante;

D = diâmetro da partícula, m.

ρ_s = densidade do solido, kg/m^3 ;

ρ = densidade do liquido, kg/m^3 .

3.2.2 Porcentagens de sólidos

A porcentagem de sólido influencia na velocidade de sedimentação, no desempenho da filtração e na floculação pode ser influenciado nas características do floculo formado.

3.2.3 Características de superfície

As características de superfície podem influenciar na agregação/dispersão da polpa e a escolha do tipo de reagente que deverá ser utilizado no espessador e na filtração.

3.2.4 Viscosidade do Fluido e da Polpa

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.

3.3 Sedimentação

A operação de sedimentação se baseia no fenômeno de transporte da partícula para o fundo de um equipamento, onde a partícula sólida em suspensão sofre ação das forças: gravidade, empuxo e resistência ao movimento (Benvindo et al. 2002).

O ensaio de proveta é utilizado para o projeto de espessadores e se baseia na curva de decantação. Este ensaio mostra uma sequência de eventos que ocorre numa polpa que é deixada sedimentar numa proveta.

Segundo Chaves (2004), se uma amostra previamente homogeneizada da suspensão for colocada em um tubo de vidro graduado de seção constante e deixada em repouso verifica-se que, após certo tempo, as partículas mais grossas depositam no fundo do tubo e as partículas mais finas continuam em suspensão. As partículas intermediárias ficam distribuídas em diversas alturas de acordo com sua granulometria.

A figura 3.1 representa eventos que ocorrem quando a polpa é deixada sedimentar numa proveta por um determinado tempo. Observa-se que, num determinado tempo, ocorre a formação de uma interface entre polpa (B) e a água clarificada (A). Esta interface move-se para baixo, inicialmente rápido, mas depois muito lentamente, até parar. No fundo da proveta, existem duas interfaces: uma polpa mais densa (E) e uma interface menos densa, um pouco mais diluída (D). Nota-se que num determinado momento existe apenas as interfaces A, D e E, pois, as partículas que estavam sobrenadando, na interface B, sedimentaram-se. Nota-se também uma transição entre as interfaces B e C que é chamada de ponto crítico, que também é chamado de regime de compressão. No regime de compressão, as partículas estão muito próximas uma das outras, ocorrendo o adensamento entre elas, devido ao peso das partículas sobrenadantes.

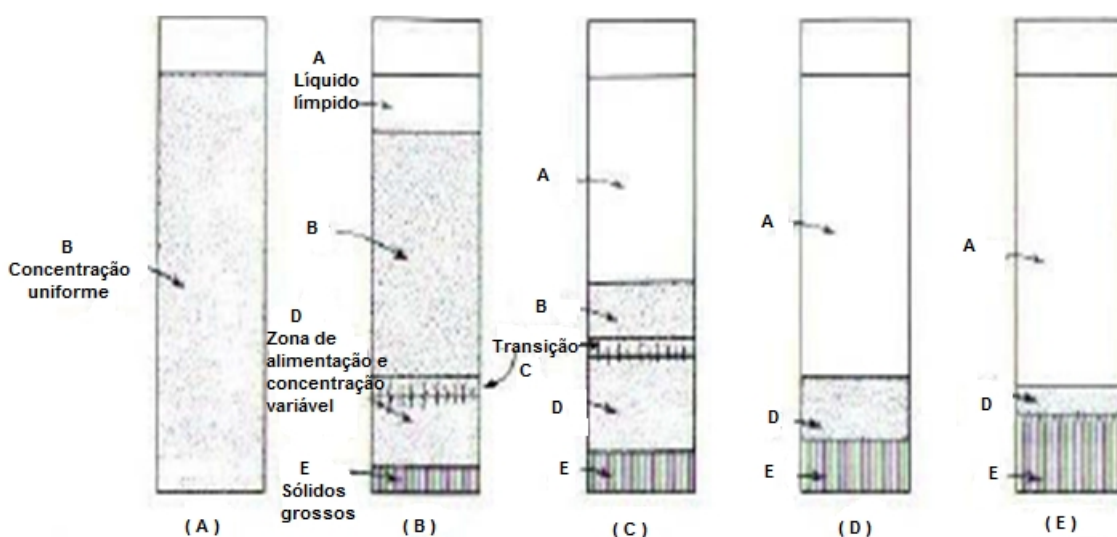


Figura 3.1. Etapas de teste de proveta e regiões formadas durante a sedimentação (Faust, 1982).

Durante o ensaio de decantação, utilizando uma suspensão concentrada, mede-se a altura h da superfície de separação entre o líquido clarificado e a suspensão e o tempo que ocorreu esta separação. Pouco depois é possível distinguir cinco zonas diferentes na proveta:

1. 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;

2. Suspensão com a mesma concentração inicial: a linha que divide A e B é geralmente nítida;
3. Zona de transição: a concentração da suspensão aumenta gradativamente de cima para baixo nesta zona, variando entre o valor inicial até a concentração da suspensão espessada. A interface B C é, de modo geral, nítida;
4. 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;
5. Sólido grosseiro: foram sólidos que decantaram logo no início do ensaio. A espessura desta zona praticamente não varia durante o ensaio.

Estes comportamentos também podem ser representados através do diagrama representativo do comportamento de polpas com diferentes tendências e agregação “Paragênese de Fitch”:

- Para densidades baixas: predomina o regime de clarificação. As partículas estão livres para se sedimentar, ocorrendo alguma colisão.
- Para densidades mais altas de polpa: as partículas ficam mais próximas uma as outras fazendo com que aumente a tendência de formação de agregados. Há formação de uma interface entre a interface contendo agregados e o sobrenadante. Este regime é conhecido como sedimentação por zona.
- Aumentando-se mais a densidade da polpa há uma maior tendência de formação de agregados que podem formar estruturas rígidas que desenvolvem a resistência a compressão. Este regime é chamado de regime de compressão.

3.4 Coagulantes e floculantes

Para melhoria no desempenho industrial, nas operações de sedimentação é utilizado floculantes e coagulantes.

Partículas finas em suspensão não são hidrodinamicamente estáveis. Porém, a estabilidade das partículas coloidais individuais pode ser diminuída pela diminuição da redução da interface e desestabilização de forças de repulsão através dos processos de floculação e coagulação.

A floculação é praticamente um pré-requisito para um eficiente processo de clarificação; um exemplo muito típico deste é o tratamento da água potável.

Partículas de tamanho maior que 10 μm e menores que 100 μm são classificadas, de acordo com Somasundaran (1980) ultrafinas, de acordo com o autor, são partículas maiores que 1 μm e menores que 10 μm em suspensão, são usados na indústria mineral.

O movimento Browniano, a agitação térmica, juntamente com a diferença de cargas das partículas promove a não sedimentação de partículas em suspensão.

Potencial Zeta pode ser definido como a medida do potencial elétrico entre a superfície correspondente ao plano de cisalhamento e o meio líquido da suspensão (Netto, 1987). Deverá reduzir o valor do potencial Zeta para que possa ter mais facilidade de atração entre sólidos suspensos, formando assim aglomeração, pois as resultantes entre as forças de atração e repulsão sofrem variações em função dos íons presentes.

Segundo Netto (1987), as condições para a coagulação e floculação são:

- ✓ Redução do potencial Zeta próximo de zero;
- ✓ Introduzir agentes químicos para a formação de coágulos e aglomerados entre as partículas;
- ✓ Fornecer energia ao meio para haver maior número de choques entre as partículas, sem ocorrer quebra dos flocos.

A variação do pH é uma variável operacional muito importante, pois esta pode melhorar ou dificultar na sedimentação. Existem faixa de pH que pode reduzir o tempo de sedimentação e a dosagem de reagentes utilizados.

3.4.1 Floculantes

Segundo os trabalhos de Sharma et al. (2006), a floculação é um processo que tem como finalidade formar agregados de partículas finamente divididas através da formação de flóculos que melhoram a sedimentação e causam a clarificação do sistema. A floculação gera uma suspensão não homogênea em uma escala macroscópica.

Os floculantes são empregados em processos de separação sólido-líquido, eles atuam em nível molecular nas superfícies das partículas para reduzir as forças repulsivas e incrementar as forças atrativas. A finalidade da adição de floculantes é formar agregados a partir de partículas finamente divididas em forma de flóculos que ao aumentar o tamanho fazem aumentar a velocidade de sedimentação permitindo a clarificação dos líquidos.

Os floculantes são reagentes químicos que formam pontes entre as partículas. O requisito para que isto possa ocorrer é a adsorção de polímeros diretamente na superfície das partículas ou na camada da interface iônica. A floculação cria flocos estáveis que podem incorporar todas as partículas da suspensão. (Pinto, 2007).

Segundo a terminologia da IUPAC a coagulação se refere aos tipos específicos de agregação que são formados grupos arranjados e é feita através da desestabilização das forças eletrostáticas das partículas. A floculação ocorre agregação de partículas formando flocos.

Os floculantes podem ser classificados de acordo com a composição química: floculantes inorgânicos e orgânicos. Os floculantes inorgânicos, segundo Sharma et al. (2006), nesta classe aparecem sais de metais multivalentes comumente com afinidade com alumínio e ferro. São utilizados há bastante tempo. Já os floculantes orgânicos, utilizados já há três décadas, podem estar classificados como floculantes orgânicos sintéticos ou floculantes orgânicos naturais, pode ser observado na tabela 3.1.

Tabela 3.1: Caracterização de floculantes orgânicos (Sharma et al., 2006).

Floculantes orgânicos sintéticos	Floculantes orgânicos naturais
- Mais efetivo devido á facilidade de emprego dos polímeros. O peso molecular, distribuição do peso molecular, natureza e porcentagem de carga iônica e a adequada estrutura dos polímeros.	- Tem um elevado peso molecular com uma constituição molecular fixa e de longas cadeias.
- Não biodegradáveis, podem ser tóxicos para o meio ambiente.	-Têm um peso molecular fixo e uma cadeia longa definida, os grupos funcionais podem ser derivados de floculantes efetivos.
- Baseado em recursos não renováveis, tais como petroquímicos, e por tanto, de elevado custo.	-Baseados em biomassas orgânicas renováveis, biodegradáveis, não tóxicas e de baixo custo.

A floculação é obtida industrialmente por uma mistura prolongada de agentes floculantes que promovem agregação de sólidos em suspensão, fazendo que aumente o tamanho das partículas.

Os mecanismos de aglomeração podem ser:

- A. Representação da rede eletrostática por eletrólitos, representado na figura (3.2a);
- B. Rede eletrostática por adsorção de superfície polieletrólitos, representado na figura (3.2b);
- C. Rede eletrostática por adsorção de superfície em sítios de polieletrólitos, representado na figura (3.2c);
- D. As pontes dia adsorção de polímeros, representado na figura (3.2 d);
- E. Adsorção de polímeros livres, representado na figura (3.2e);
- F. Imersão na estrutura de gel por ligações de polímeros, representado na figura (3.2f);

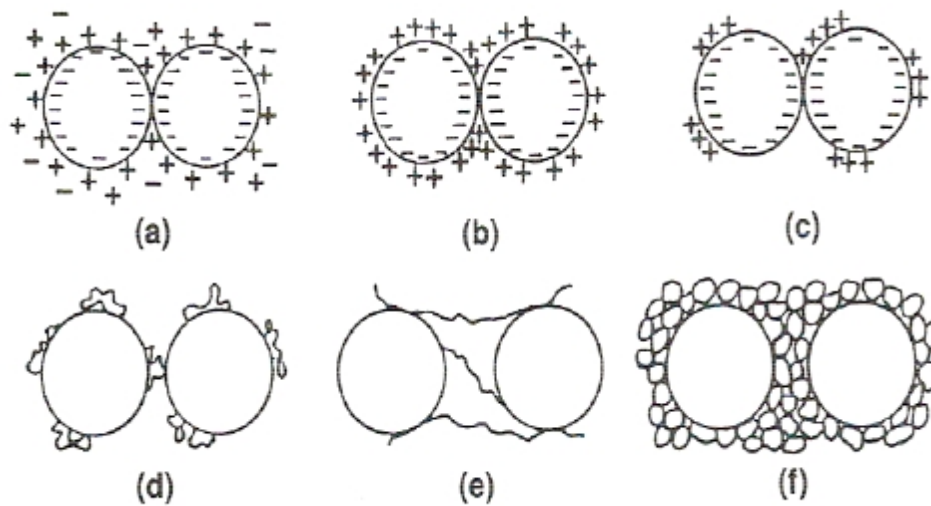


Figura 3.2: Esquema de diferentes tipos de aglomeração
(Bohuslav Apud Pinto / 2007).

3.4.2 Coagulantes

No processo de coagulação, é necessária a adição de reagentes químicos a uma suspensão coloidal que resulta uma desestabilização das partículas, que produzem forças repulsivas, que reduz a tendência das partículas se manterem afastadas, fazendo que as forças de Van der Waals predominem permitindo a aglomeração das partículas. Logo, coagular significa diminuir as forças eletrostáticas de repulsão devido as cargas superficiais das partículas, possibilitando que estas se aproximem e se juntem através das forças de Van der Waals, formando um aglomerado denominado “coágulo”. A coagulação é realizada industrialmente adicionando reagentes adequados, que dará uma propriedade de adesividade quando as partículas estiverem em contato. Todo o processo ocorre em um curto espaço de tempo, às vezes, menos de um segundo (Cohen,1971).

Na figura 3.3 mostra a aproximação de duas partículas que carregam cargas negativas e positivas, fazendo um esquema de aproximação entre elas, em que caso a força de Van der Waals predomine, as interações entre as partículas irão permitir a desestabilização e atração será possível.

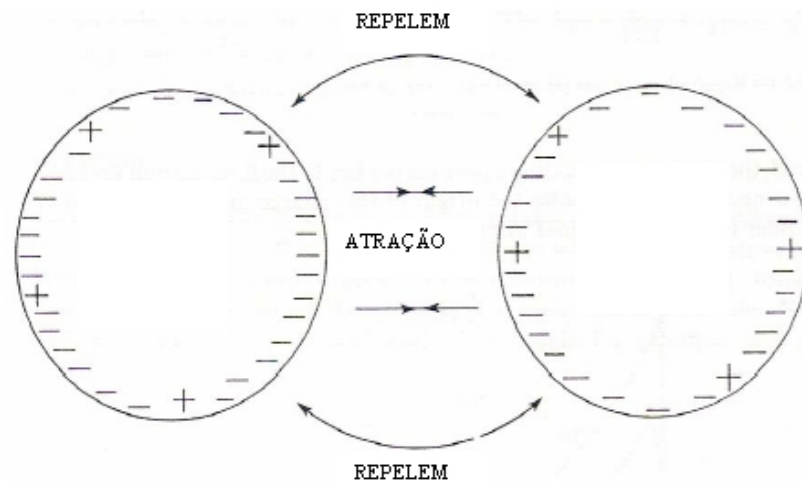


Figura 3.3: Esquema de aproximação de duas partículas (Osborne,1981).

Os principais mecanismos que atuam na coagulação são:

- Compressão da camada difusa: ocasiona a desestabilidade dos finos com adição de íons com carga contrária;
- Adsorção e neutralização: ocorre desestabilização através de reações de coagulantes com os colóides, mas com uma dosagem menor de coagulante;
- Adsorção e formação de pontes: utiliza polímeros como reagentes que formam sítios ionizáveis ao longo de suas cadeias;
- Varredura: há formação de precipitados formados através de reações dos coagulantes com sólidos presentes.

A tabela 3.2 mostra os principais características de floculantes e coagulantes mais comuns.

Tabela 3.2 – Principais características de alguns floculantes e coagulantes mais utilizados (Valadão & Araujo, 1991)

Floculante	Fórmula química	Concentração típica (mg/L)	Operação Faixa de pH	Faixa ótima de pH
Poliacrilamida Não Iônica	$\begin{array}{c} -\text{CH}-\text{CH}_2-\text{CH}-\text{CH}_2-\text{CH}-\text{CH}_2- \\ \quad \quad \quad \quad \\ \text{CO} \quad \quad \text{CO} \quad \quad \text{CO} \\ \quad \quad \quad \quad \\ \text{NH}_2 \quad \quad \text{NH}_2 \quad \quad \text{NH}_2 \end{array}$	1 - 30	0 - 12	-
Poliacrilamida Aniônica	$\begin{array}{c} -\text{CH}-\text{CH}_2-\text{CH}-\text{CH}_2-\text{CH}-\text{CH}_2- \\ \quad \quad \quad \quad \\ \text{CO} \quad \quad \text{CO} \quad \quad \text{CO} \\ \quad \quad \quad \quad \\ \text{NH}_2 \quad \quad \text{NH}_2 \quad \quad \text{O}^- \end{array}$	1 - 30	5,5 - 11	-
Poliacrilamida Catiônica	$\begin{array}{c} -\text{CH}-\text{CH}_2-\text{CH}-\text{CH}_2-\text{CH}-\text{CH}_2- \\ \quad \quad \quad \quad \\ \text{CO} \quad \quad \text{CH}_2 \quad \quad \text{CO} \\ \quad \quad \quad \quad \\ \text{NH}_2 \quad \quad \text{R}-\text{N}-\text{R}^1 \quad \quad \text{NH}_2 \\ \quad \quad \quad \\ \quad \quad \quad \text{R}^2 \text{ Cl}^+ \end{array}$	1 - 30	4 - 12	5 - 9
Óxido de Polietileno	$(\text{C}_2\text{H}_4\text{O})_n$	1 - 100	3 - 11	-
Amido	$(\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5)_n$	5 - 200	2 - 10	-
Coagulantes				
Cal	CaO	500 - 2000	5 - 13	10 - 12
Sulfato de Alumínio	$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	15	5,5 - 7,5	5,9 - 6,1
Sulfato férrico	$\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$	5 - 150	4,5 - 8,0	5,6 - 5,7
Sulfato ferroso	FeSO_4	200	> 9,5	-

3.5 Classificações dos Sedimentadores

Os sedimentadores podem ser classificados de acordo com seu funcionamento e finalidade.

3.5.1 Divisão dos Sedimentadores quanto ao regime de funcionamento:

3.5.1.1 Descontínuos:

É utilizado quando o processo for por batelada. São usados tanques cilíndricos com a solução em repouso por um certo tempo. Esses processos por bateladas necessitam de quatro passos:

- Preencher o tanque com lama;
- Deixando a pasta para uma determinada hora até que o sólido foi para a parte inferior do tanque;
- Decantação do sobrenadante clarificado desde a parte superior do tanque;
- Remoção do líquido acumulado no fundo do tanque.

Este ciclo, dependendo das propriedades de sólidos e líquidos, pode exigir longa retenção e, portanto vários tanques devem estar incorporados no layout para operar em etapas sequenciais.

3.5.1.2 Contínuos:

São tanques rasos de grande diâmetro, em que operam grades com função de remover a lama. A alimentação é feita pelo centro do tanque.

3.5.2 Classificação dos sedimentadores quanto a sua finalidade:

3.5.2.1 Clarificadores:

Utilizados onde a fase de interesse é o líquido limpo.

3.5.2.2 Espessadores:

Utilizados onde a fase de interesse e a zona de lama.

3.6 Tipos de Espessadores

Os espessadores são equipamentos de grande porte, e geralmente instalados fora da usina. Basicamente são tanques de concreto equipados com mecanismo de raspagem para carrear o material sedimentado até o ponto de retirada. Além desta função, também desempenha seguintes funções: aumenta a densidade do espessado, organiza partículas sólidas uma sobre as outras de modo a ocupar menor volume possível e mantém o sólido em suspensão, evitando o aterramento do espessador.

Os sólidos se precipitam com maior facilidade acrescentando coagulantes ou floculantes e depois de precipitados são arrastados pelo centro através de “rastelos”.

Os rastelos devem se movimentar lentamente fazendo com que transporte e adense os sólidos de forma que facilita a retirada do *underflow* em operações contínuas.

A velocidade do rastelo deverá ser bem calculada, pois se tiver uma velocidade baixa irá sedimentar-se mais, e dificultará os movimentos dos braços do rastelo. Em contrapartida, se tiver uma velocidade alta produzirá turbulências e descompactação da polpa no *underflow*. A velocidade ideal permite a retirada do concentrado pelo fundo e promove a abertura de canais da polpa floculada, propiciando a saída de água que iria para o *underflow* (Mcketta, 1993).

A figura 3.4 representa alguns modelos de rastelos aplicados em equipamentos contínuos na indústria.

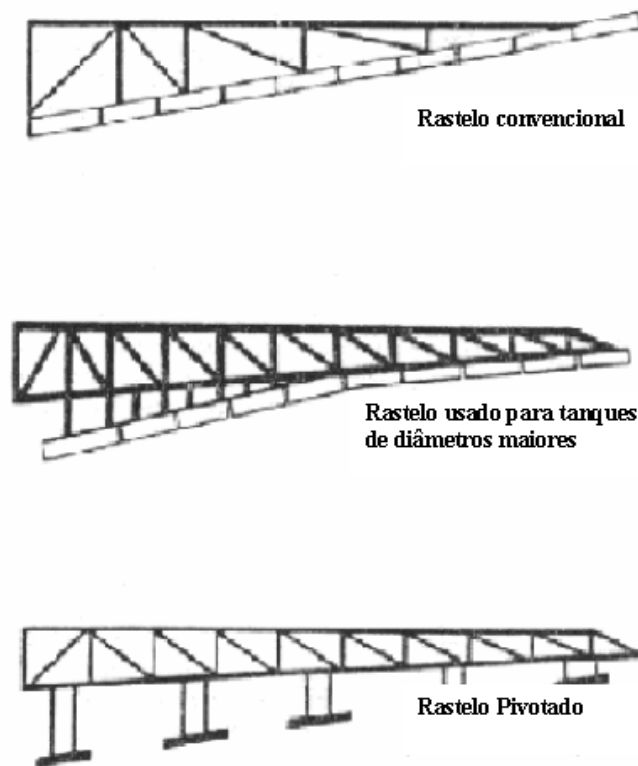


Figura 3.4: Esquema de diferentes tipos de rastelos (Mcketta, 1993).

O uso de rastelo pivotado é para polpas com substâncias que tem problema com incrustações, exemplo: polpas de aluminato de sódio.

A eficiência de um espessador é avaliada pela capacidade medidas em termos de volume de polpa de alimentação e pela qualidade de produtos, ou seja, pela quantidade de sólidos no *underflow* e no *overflow*. (Chaves, 2004)

Seis parâmetros principais afetam a eficiência do espessador, de acordo com (Taggart, 1927):

1. Densidade da polpa;
2. Tamanho e forma das partículas solidas;
3. Diferença entre a densidade solida e da fase liquida;
4. Presença de agregantes;
5. Viscosidade da polpa;
6. Temperatura da polpa.

Mais recentemente Pearse (1977) estendeu esta lista:

7. Método de aplicação de agregantes;
8. Característica de molhabilidade das partículas;
9. Modo de alimentação;
10. Modo de retirada do *underflow*;
11. Existência de corrente de convecção;
12. Perturbação de ventos;
13. Evaporação.

Os tipos de espessadores variam em função da granulometria e forma com que o equipamento é alinhado.

Os espessadores podem ser classificados como:

- Convencional
- Alta capacidade
- Lamelas
- Cones de sedimentação

3.6.1 Espessador contínuo convencional

A alimentação é feita pela parte superior do equipamento. As partículas sólidas se sedimentam livremente e formarão no fundo do equipamento a região de compactação. É um tanque que tem a entrada para a suspensão e a retirada de espessado com auxílio de braços raspadores, como pode ser vista na figura 3.5.

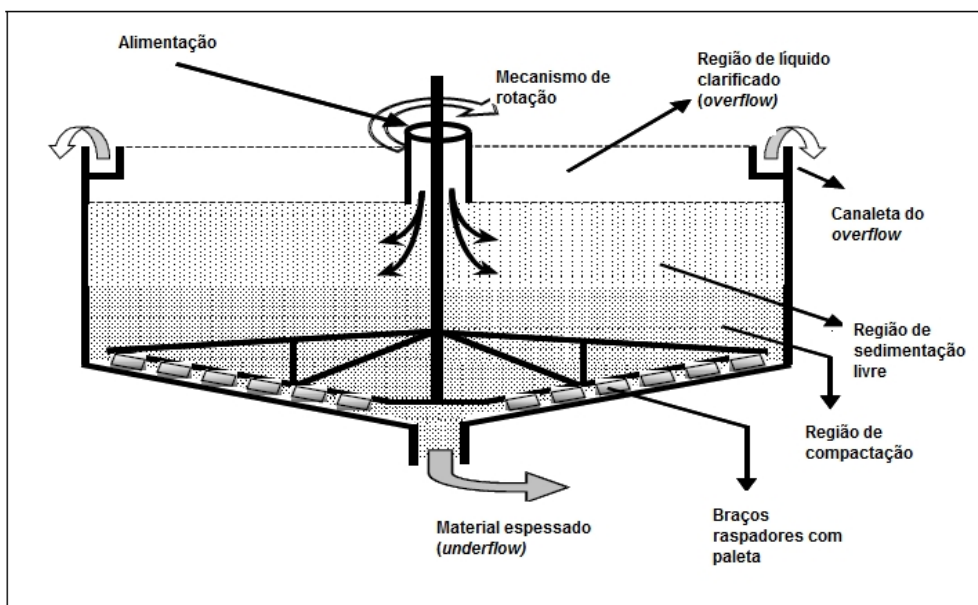


Figura 3.5: Diagrama ilustrativo de um espessador contínuo convencional, tipo Dorr-Oliver (França,2007).

As principais características do espessador são:

- Forma cilindro-cônica: a parte de cima é um cilindro de diâmetro muito maior que a altura e a parte inferior é um cone com apex voltado para baixo;
- Calha para coleta de *overflow* em forma de anel;
- Calha para alimentação e passarela para mecanismo de giro;
- Alimentador que tem função de diminuir a energia cinética da polpa que vem pela calha de alimentação;
- Mecanismo de giro e braço das pás;
- Cones de remoção de *underflow*.

A alimentação chega por meio de uma tubulação ao centro do espessador. Existe um dispositivo chamado *feedweell*, que pode ser vista na figura 3.6, que divide o fluxo da alimentação para evitar que a entrada do fluxo da alimentação entre com turbulência. A alimentação é feita através de calhas, por gravidade com uma velocidade entre 2,5 a 3,0 m/s. Inclinações de 1,5% são necessárias para que esta velocidade seja adquirida.

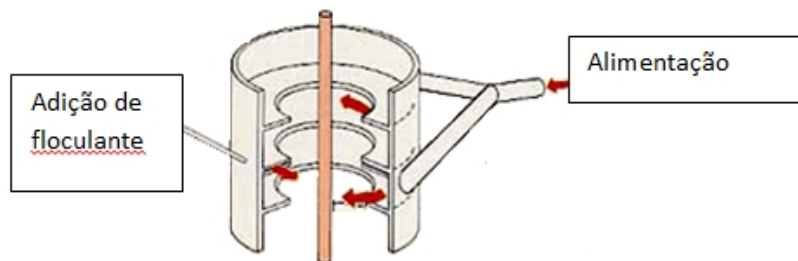


Figura 3.6: Representação de um *feedweel* (Chaves, 2004).

O *feedweel*, mecanismo de acionamento do *rake*, e o dispositivo de elevação são instalados no centro do espessador e para sustentá-los são utilizadas três configurações básicas: Estas configurações podem ser observadas através da figura 3.7.

1. Em ponte: utilizados para espessadores com diâmetro inferior a 30 metros. Os dispositivos mecânicos são instalados sobre uma viga apoiada sobre duas colunas externas ao espessador. A retirada do *underflow* é através de um orifício no ápice do espessador, por meio de bombas de diafragma.
2. Em coluna: utilizados para espessadores com diâmetro inferior a 25 metros. Os dispositivos são instalados sobre uma estrutura metálica, colocada no centro, e apoiada no fundo do espessador. Utilizam-se bombas centrífugas alojada em um túnel construído debaixo do espessador e a descarga é feita através de uma abertura anular em torno da coluna
3. Em *caisson* : utilizados quando há inconveniências na construção do túnel sob o espessador (problemas geotécnicos, topografia, custo de escavação, etc.) Constrói-se no centro dos espessador, uma estrutura de concreto armado, de secção circular ou quadrada, do fundo ate a superfície. No fundo são instaladas as bombas de *underflow* e no topo os mecanismos do espessador.

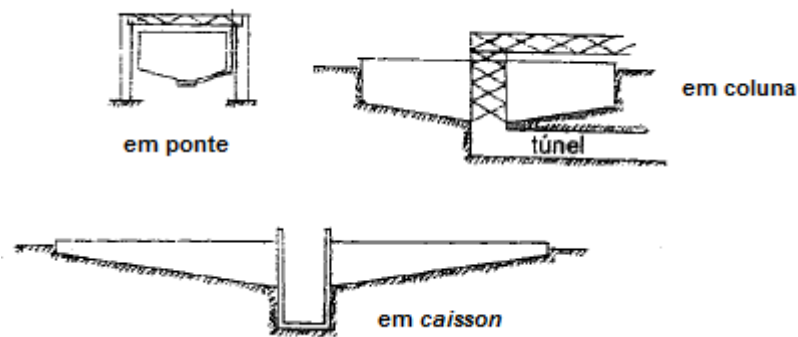










Figura 3.7: Alimentador de um espessador de alta capacidade (Chaves, 2004).

Os tipos de equipamentos existentes para espessamento de polpas variam de acordo com a sua geometria. A escolha do espessador depende principalmente das características do material e do nível de adensamento desejado no *underflow*. Os tipos de espessadores normalmente aplicados na etapa de adensamento de polpas de minério de ferro são apresentados na Tabela 3.3.

Para as lamas de minério de ferro, podem-se conseguir polpas mais adensadas ou mesmo pasta mineral, com a escolha de espessadores tipo High Density ou Deep Cone, respectivamente.

Tabela 3.3 - Tipos de espessadores para adensamento de polpas de minério de ferro (Door Oliver modificado)

Tipos	Forma	Características
<p><i>convencional</i></p> 		<ul style="list-style-type: none"> - Ação ineficiente do floculante - Grande área - Baixa densidade no <i>underflow</i>
<p><i>High Rate</i> ou <i>High Capacity</i></p> 		<ul style="list-style-type: none"> - Adição de floculante via <i>feed-well</i> (ação eficiente) - Área menor que o <i>Hi Rate</i> - Densidade no <i>underflow</i> similar ao espessador convencional
<p><i>High Density</i></p> 		<ul style="list-style-type: none"> - Altura maior que o <i>High Capacity</i> - Redução da área em relação ao <i>High Capacity</i> - Máxima densidade da polpa no <i>underflow</i>.
<p><i>Deep Cone</i></p> 		<ul style="list-style-type: none"> - Aumento da altura em relação ao <i>High Density</i> - Maior redução da área - Produção de pasta mineral

3.6.2 Espessadores de alta capacidade

Os espessadores de alta capacidade ocupam menor área unitária e tem maior produtividade comparada aos espessadores convencionais. Os espessadores convencionais ocupam uma área unitária de aproximadamente 5 a 10 pés quadrados por tonelada por dia e um espessador de alta capacidade a área unitária é aproximadamente 0,3 a 0,6 pés quadrados por tonelada por dia. (Chaves, 2004).

3.6.3 Espessadores de lamelas

Os espessadores de lamelas, que e também um espessador de alta capacidade, tem uma área unitária reduzida, mas existe uma necessidade de uso de floculantes para seu desempenho.

Este equipamento consiste numa série de placas inclinadas (lâminas), dispostas lado a lado, formando canais, representado na figura 3.8. A vantagem dessa configuração e a economia de espaço, uma vez que a capacidade de sedimentação nesses equipamentos e bem maior que no espessador convencional, pois a área efetiva de sedimentação e dada pela soma das áreas projetadas de cada lamela. Outra vantagem da configuração lamelar está na rápida sedimentação das partículas sólidas: como o tempo de sedimentação é proporcional à altura de queda vertical, este tempo pode ser reduzido, diminuindo-se o espaçamento entre as lamelas.

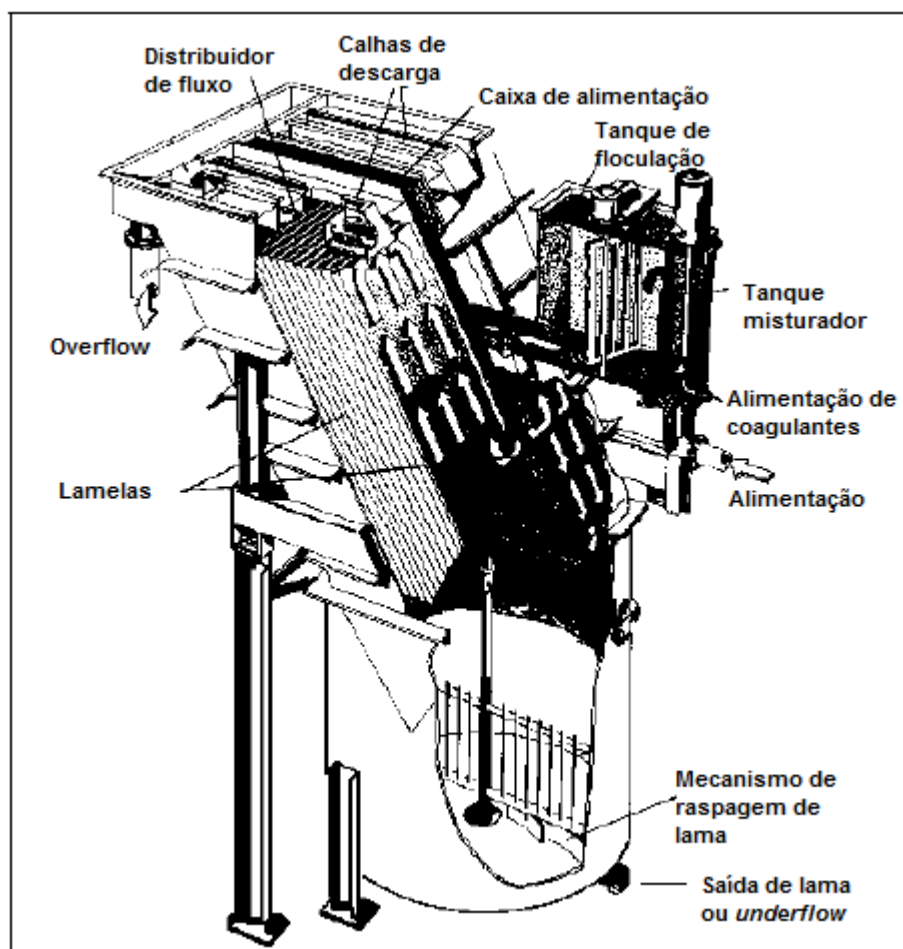


Figura 3.8: Espessador de Lamelas (França & Massarani 2004).

3.6.4 Espessador com Alimentação Submersa

Os espessadores com alimentação submersa, que também é um espessador de alta capacidade, a alimentação é feita em um ponto no interior da camada de compactação dos sólidos (Figura 3.9). O aumento em sua capacidade é devido às partículas em suspensão já serem alimentadas no leito de sólido já sedimentado, onde as partículas ficam aprisionadas. O líquido da suspensão percola, no sentido ascendente, através desse leito de partículas, isto é, na direção da região de líquido clarificado.

Entretanto, 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.

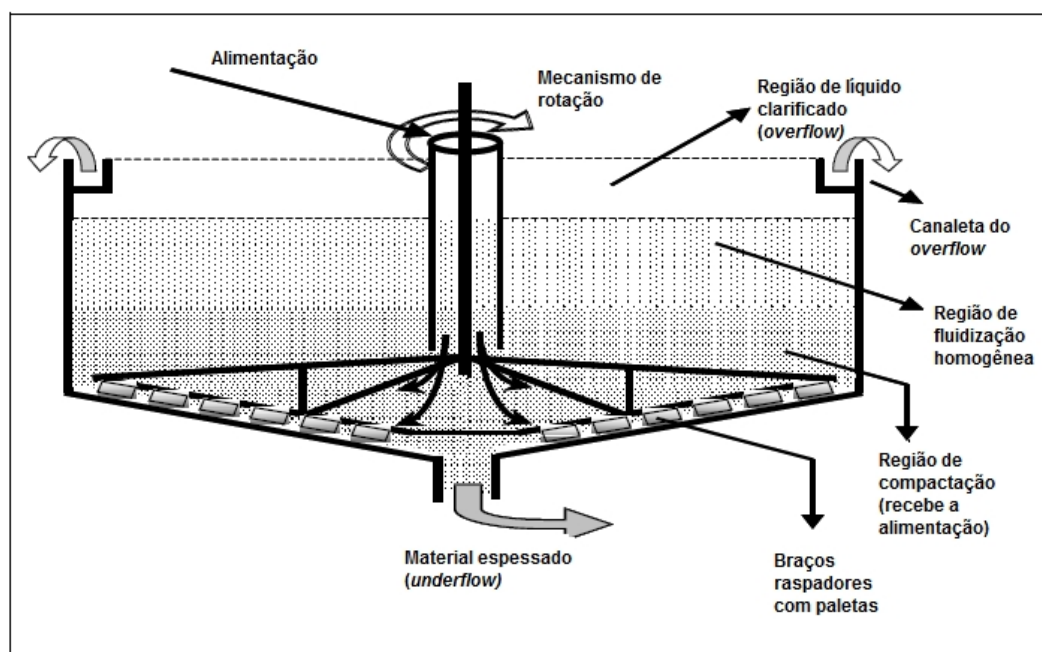


Figura 3.9: Diagrama ilustrativo de um espessador contínuo de alta capacidade com alimentação submersa (França, 2007).

3.6.5 Modelos de espessador de alta capacidade:

3.6.5.1 Espessador Ultrasep

Este tipo de espessador, utilizado pela empresa DELKOR, como pode ser visto na figura 3.10, não possui partes móveis e a necessidade de manutenção é baixa.



Figura 3.10: Espessador de alta capacidade Ultrasep medindo 7m de diâmetro x 10 m de altura, utilizado para minerais pesados, localizado Namakwa Sands, África do Sul (DELKOR).

O funcionamento deste espessador tem como base em três princípios:

- ✓ Lama diluída, uma vez floculada, assenta mais prontamente do que lama não diluída;
- ✓ A redução de velocidade da lama floculada resulta em sedimentação de sólidos provenientes da solução;
- ✓ Sedimentação da lama sobre superfícies inclinadas deslizam e se consolidam, liberando água.

O controle poderá ser feito da seguinte maneira: o *underflow* é controlado com base na densidade, a adição de floculantes para que a sedimentação seja mais rápida, controle de nível.

O dimensionamento deverá ser realizado das seguintes formas: testes em laboratórios, testes em plantas piloto e cálculo manual com base nas informações da empresa.

É usado no processo industrial metalúrgico e de mineração para o espessamento do circuito da usina, decantação contra corrente, aterro e recuperação de finos de carbono, desaguamento e recuperação de água e tratamento de escória.

3.6.5.2 Espessador de Pasta

O Espessador de Pasta DELKOR, como é visto na figura 3.11, é utilizado quando ao atendimento extremo das demandas de processo e mecânicas exigidas no tratamento de *underflow* de alta reologia.



Figura 3.11 Espessador de pasta República Dominicana (DELKOR)

O Espessador de Pasta funciona de acordo com os seguintes princípios:

- ✓ O material alimentado é diluído ao melhor nível de floculação;
- ✓ Estabilidade de uma Zona Altamente Compactada;
- ✓ Arrastadores levam o material para o centro para serem retirados. Os arrastadores também ajudam no desaguamento do material;
- ✓ O líquido clarificado é descarregado para um lavatório circunferencial no topo do tanque.

O controle típico do Espessador de Pasta deverá ser feito considerando a densidade do *underflow* do leito controla a saída do *underflow* de lama, a dosagem do floculante é controlada por um mecanismo de detecção do nível do leito, o torque é monitorado

usando-se pressão hidráulica e a clareza do *overflow* é medida usando um mecanismo de turbidez como opção.

3.6.5.3 Espessador de Alta Escala

O Espessador de Alta Escala da DELKOR, representado pela figura 3.12 poderá ser utilizados em várias aplicações incluindo produtos minerais, industriais, químicos, tratamento de água e águas residuais de indústrias.



Figura 3.12: Espessador de Alta escala Cerro Verde Peru (DELKOR).



Figura 3.13: Espessador de Alta Escala, Escondida, Chile (DELKOR).

O Espessador de Alta Escala funciona de acordo da seguinte maneira:

- ✓ O material alimentado é diluído ao melhor e mais eficiente nível de floculação para se obter a melhor produção de sólidos;
- ✓ As partículas floculadas se depositam nas zonas de assentamento obstruídas por densidades mais altas presentes na zona de compressão;
- ✓ Raspadores levam o material para o centro para serem retirados. Os raspadores também ajudam no desaguamento do material;
- ✓ O líquido clarificado é descarregado para um lavatório circular no topo do tanque.

O controle típico de um espessador de Alta Taxa poderá ser feito na densidade do *underflow* do leito controla a saída do *underflow* de lama, a dosagem do floculante é controlada por um mecanismo de detecção do nível do leito e a clareza do *overflow* é medida usando um mecanismo de turbidez, como opção.

3.6.5.4 Espessador de Alta Densidade

O Espessador de Alta Densidade DELKOR, como pode ser visto na figura 3.14, considera densidades maiores de *overflow* e melhores recuperações da água sem custo extra no sistema de bombeamento para transporte. O *underflow* poderá ser transportado por bombas centrífugas. Ao aumentar a altura do leito de lama dentro do espessador a DELKOR conseguiu atingir densidades que não eram possíveis de se obter com um espessador de alta taxa.

Os equipamentos têm paredes mais altas e um piso mais inclinado para maximizar as densidades. Densidades mais altas resultaram em uma demanda de mais torque por parte do acionamento; também, o mecanismo de rastreamento passou a varrer um material de maior viscosidade. A faixa de acionamentos da DELKOR com torque de até 14 MNm podem facilmente lidar com esses estresses de alta produção. O sistema de rastreamento minimiza a dragagem ao mesmo tempo em que melhora a densidade do *overflow*.



Figura 3.14: Espessador de alta densidade (DELKOR)

O Espessador de Alta Densidade funciona de acordo com os seguintes princípios:

- ✓ O material alimentado é diluído ao nível máximo de floculação e/ou compactação;
- ✓ As partículas floculadas se depositam nas zonas de assentamento obstruídas por densidades mais altas presentes na zona de compressão;
- ✓ Os raspadores empurram o material para o centro para a retirada. Os raspadores também ajudam no desaguamento do material;
- ✓ O líquido clarificado é descarregado para um lavatório circunsférico no topo do tanque.

O controle típico de um espessador de Alta Densidade deverá estar na densidade do *underflow* (para controlar a retirada do *underflow* de lama), a dosagem do floculante é controlado através de um mecanismo de detecção do nível do leito, o torque é monitorizado usando-se uma carga hidráulica ou elétrica e a clareza do *overflow* é medida usando o mecanismo de turbidez, como opção.

3.6.6 Diferentes tipos de modelos de Espessadores de Lamelas

3.6.6.1 Modelos LT

O modelo LT como mostra a figura 3.15, é designado para área de 15 a 500 m², e são aplicados para pequenas a médias porcentagens de sólidos e para frações grosseiras. Tem opções de controle automático do *underflow*, *rake* automático.



Figura 3.15: Modelo LT de Espessador de Lamelas (METSO, 2006).

3.6.6.2 Modelo LTS

O modelo LTS, como mostra a figura 3.16 combina o tanque circular e o *rake* mecânico com a capacidade de clarificação do LT das placas paralelas.



Figura 3.16: Modelo LTS de Espessador de Lamelas (METSO, 2006).

3.6.6.3 Modelos LTK

O modelo LTK, como pode ser visto na figura 3.17, é semelhante ao LTS, mas, o diâmetro de sedimentação é maior. Este modelo é usado quando há necessidade de um tempo de sedimentação maior e uma densidade do *underflow* maior.



Figura 3.17: Modelo LTK de Espessador de Lamelas (METSU, 2006).

3.7 Dimensionamento de Espessadores

As principais informações necessárias ao dimensionamento de espessadores são: capacidade requerida para alimentação, *overflow* e/ou *underflow*; características dos sólidos (tamanho, forma e massa específica das partículas); características do líquido (viscosidade e massa específica); estado de agregação/dispersão das partículas suspensas no líquido e razão mássica sólido-líquido na suspensão que será submetida à operação unitária de espessamento (Metcalf et al, 1979).

Coe e Clevenger foram os primeiros a estudar o dimensionamento, em 1916, através de sedimentação em provetas. Eles propuseram colocar a polpa que se deseja espessar em provetas graduadas, monitorando-se em função do tempo (T_c), a altura (H_c) da linha divisória (LD) entre o líquido já clarificado e o restante da polpa que estava sendo espessada.

A representação gráfica do comportamento de H_c versus T_c foi denominada curva de sedimentação, observado na figura 3.18. Foram eles que observaram a descontinuidade da curva de sedimentação e do ponto crítico (passagem de um regime de transição para o de compressão).

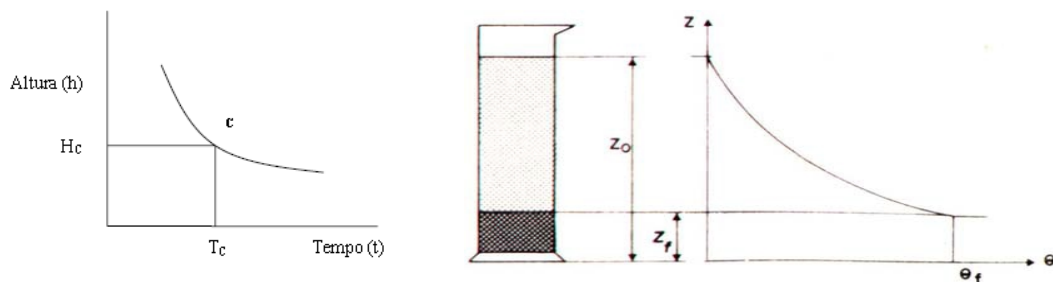


Figura 3.18 : Curva altura versus tempo (Coe e Clevenger, 1917)

Roberts(1949), Talmadge-Fitch(1955) e Metcalf(1979), entre outros, utilizaram a curva de sedimentação para analisar o mecanismo de sedimentação e projetar através de modelamento matemático ou gráfico, a área necessária de um espessador contínuo.

Outro modelo, usado em teste de batelada para análise que se pode citar é o tubo longo de 3 metros de comprimento e 4 polegadas de diâmetro, observado na figura 3. 19. O tubo é preenchido com amostra, e ao longo deste a amostra é coletada para análise. Para a coleta, o tubo perpendicular é introduzido até cerca da metade do diâmetro. Abre-se a válvula e retira-se o volume de polpa a ser analisada. Para polpas floculadas, devem ser considerados rearranjos físicos e forças de colisão ao longo do tubo (Osborn, 1981).

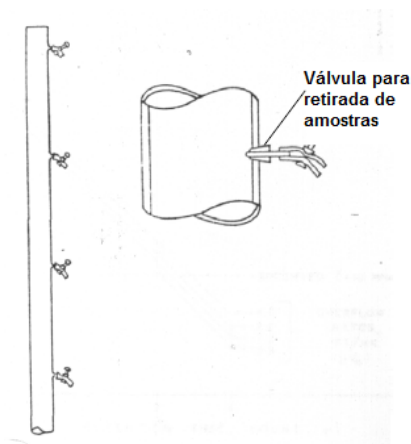


Figura 3.19: Método de tubo longo(Pinto,2007)

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

3.7.1 Método de Coe e Clevenger

Eles postularam uma teoria onde existem dois regimes de sedimentação: sedimentação livre, em que as partículas sofrem influências apenas de forças hidráulicas, e o outro regime em que as partículas exercem força de compressão uma sobre as outras.

Neste método, 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 3.20).

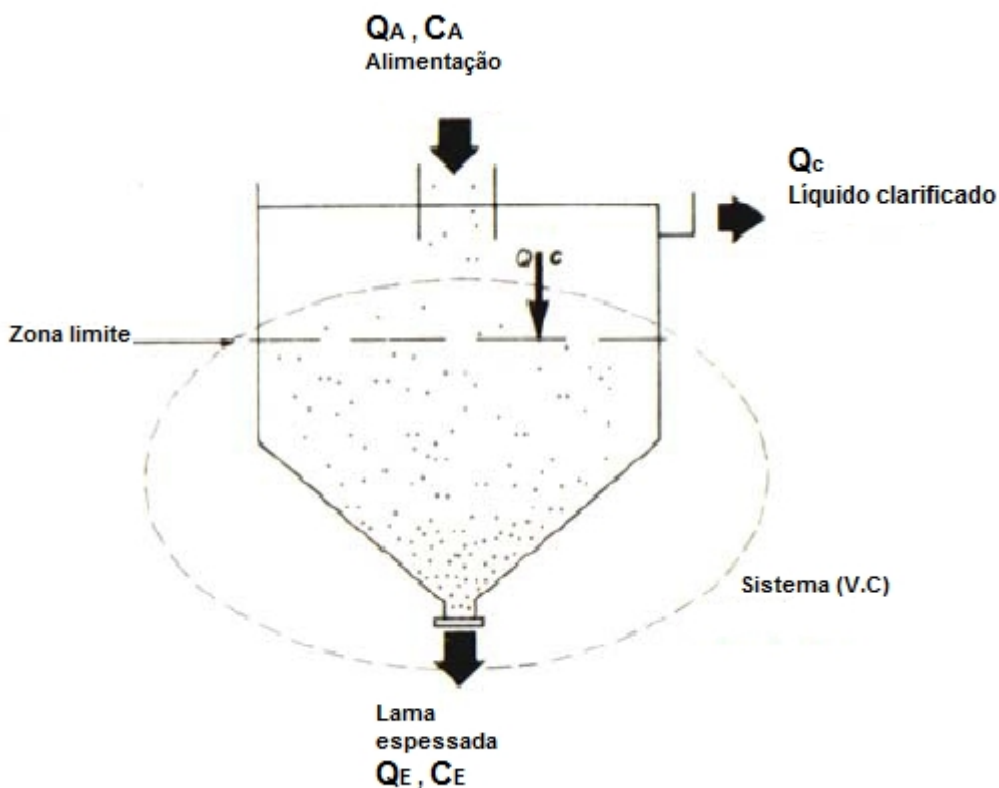


Figura 3.20: Indicação da zona limite em um decantador (Moreira,2004).

Sendo que:

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 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 do sólido obtido durante ensaios de decantação descontínuos não se alteram quando se passa para o equipamento de larga escala. Esta afirmativa nem sempre é verdadeira, pois quando é utilizado flocculantes a velocidade de sedimentação pode ser diferente daquela a qual não se utilizou nenhum flocculante.

As velocidades de decantação em diferentes concentrações são determinadas em experimentos isolados. Determina-se a velocidade inicial de decantação para uma dada concentração de suspensão com uma concentração inicial de sólidos e depois dilui-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%.

Para que não haja arraste de partículas sólidas na direção do vertedor de líquido clarificado é necessário que a velocidade de ascensão do líquido seja menor que a velocidade de decantação das 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:

$$Q_C = Q - Q_E \quad (3.4)$$

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:

$$u = \frac{Q - Q_E}{S} \quad (3.5)$$

Logo

$$S = \frac{Q - Q_E}{u} \quad \dots\dots\dots(3.6)$$

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

- ✓ Regime permanente;
- ✓ Não há arraste de sólidos.

$$Q_A C_A = QC = Q_E C_E \quad \dots\dots\dots(3.7)$$

Então:

$$Q = \frac{Q_A C_A}{C} \quad \text{e} \quad Q_E = \frac{Q_A C_A}{C_E} \quad \dots\dots\dots(3.8)$$

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

$$S = \frac{Q_A C_A \left(\frac{1}{C} - \frac{1}{C_E} \right)}{u} \dots\dots\dots(3.9)$$

Onde

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.

3.7.2 Métodos de Kynch

Kynch, um matemático, que desenvolveu em 1952 um método de dimensionamento de decantadores que requer apenas um ensaio que forneça a curva de decantação (Z versus θ) mostrada na Figura 3. 21. 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):

$$u = \frac{Z_i - Z}{\theta} \dots\dots\dots(3.10)$$

Onde:

- Z = altura da interface (m);
- θ = tempo;
- C_0 = concentração inicial da suspensão (t/m^3);
- Z_i = altura inicial da suspensão (m).

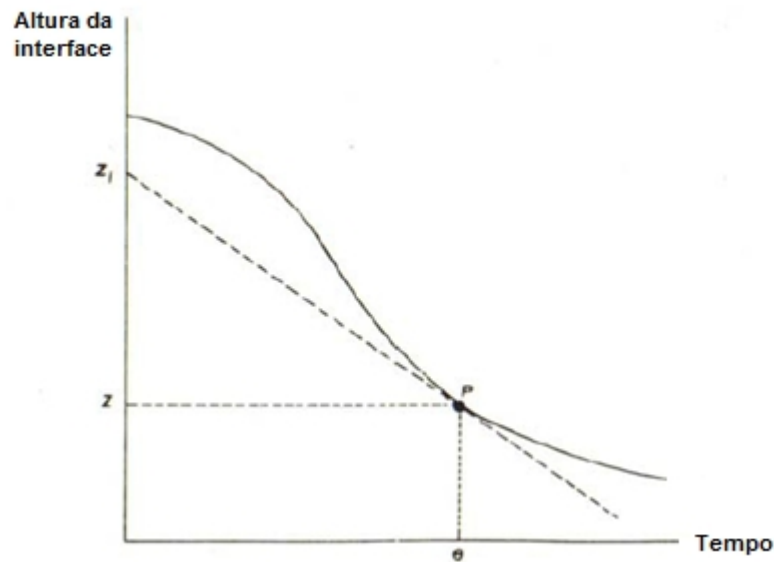


Figura 3.21: Determinação gráfica de u e C pelo método de Kynch (Moreira,2004).

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.

$$S = \frac{Q_A C_A \left(\frac{1}{C} - \frac{1}{C_E} \right)}{u} \dots\dots\dots(3.11)$$

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

3.7.3 Métodos 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 monolog (Figura 3.22). 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:

$$S_{\min} = \frac{Q_A C_A \left(\frac{1}{C_C} - \frac{1}{C_E} \right)}{u_C} \dots\dots\dots(3.11)$$

Onde:

$$C_C = \frac{C_o Z_o}{Z_{ic}} \dots\dots\dots(3.12)$$

$$u_C = \frac{Z_{ic} - Z_C}{\theta_C} \dots\dots\dots(3.13)$$

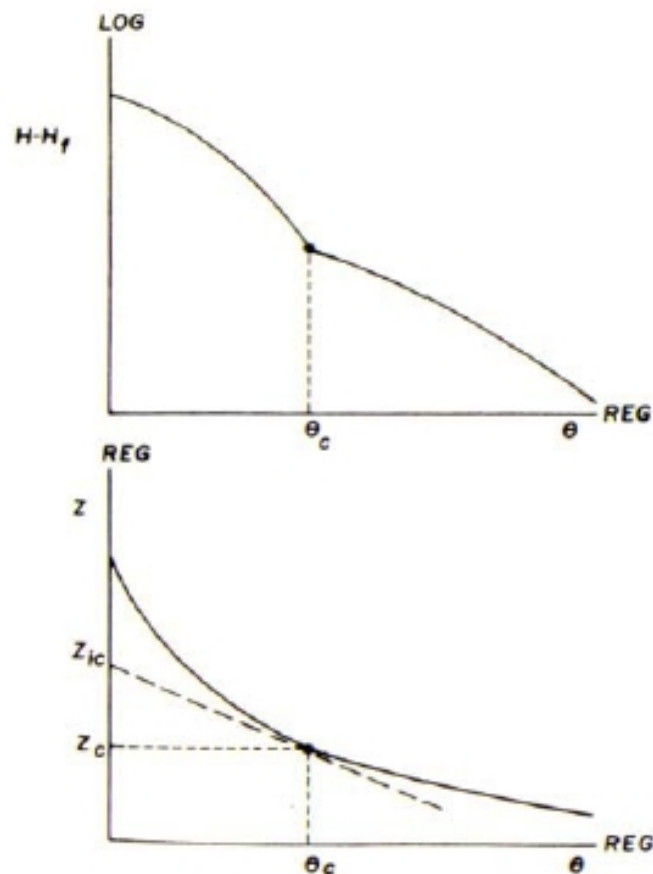


Figura 3.22: Construção gráfica do método de Roberts (Moreira,2004).

3.7.4 Métodos 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 3.23). Uma construção gráfica muito simples fornece diretamente θ_E pelo cruzamento da tangente no ponto P_C com a horizontal $Z_E = Z$, 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:

$$S_{\min} = \frac{Q_A C_A \left(\frac{1}{C_C} - \frac{1}{C_E} \right)}{u_C} \dots\dots\dots(3.11)$$

$$C_C = \frac{C_o Z_o}{Z_{ic}} \dots\dots\dots(3.12)$$

$$u_C = \frac{Z_{ic} - Z_C}{\theta_C} \dots\dots\dots(3.13)$$

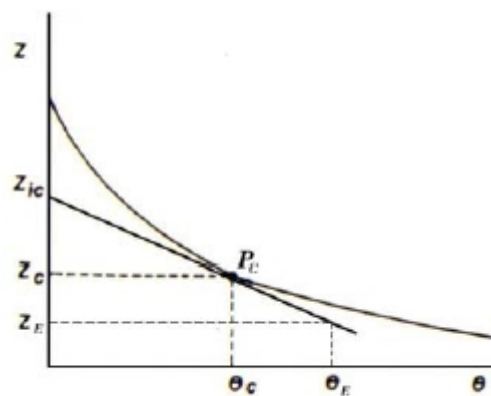


Figura 3.23: Construção gráfica de Talmadge e Fitch (Moreira,2004).

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

$$S_{\min} = \frac{Q_A C_A \left(\frac{Z_{ic}}{C_O Z_O} - \frac{1}{C_E} \right)}{\frac{Z_{ic} - Z_E}{\theta_E}} = \frac{Q_A C_A}{C_O Z_O} \left(Z_{ic} - \frac{C_O Z_O}{C_E} \right) \frac{\theta_E}{Z_{ic} - Z_E} \dots\dots\dots(3.14)$$

Como:

$$Z_E = \frac{C_O Z_O}{C_E} \dots\dots\dots(3.15)$$

$$S_{\min} = \frac{Q_A C_A \theta_E \left(Z_{ic} - \frac{C_O Z_O}{C_E} \right)}{C_O Z_O \left(Z_{ic} - \frac{C_O Z_O}{C_E} \right)} \dots\dots\dots(3.16)$$

A área mínima será:

$$S_{\min} = \frac{Q_A C_A \theta_E}{C_O Z_O} \dots\dots\dots(3.17)$$

3.8 Dimensionamentos 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, C_A (t/h);
- Vazão volumétrica do sólido: $Q_A, C_A / \rho_s$ (m³/h);
- Tempo de residência do sólido na zona de compressão: $t_E - t_C$.

Logo o volume de sólido na zona de compressão V_s é dado por:

$$V_s = \frac{Q_A C_A}{\rho_s} (t_E - t_C) \dots\dots\dots(3.18)$$

Considerando:

- ✓ V = volume de suspensão de densidade média (ρ_m);
- ✓ V_s = volume do sólido.

$$V \rho_m = V_s \rho_s + (V - V_s) \rho \quad \dots\dots\dots(3.19)$$

$$V = V_s \frac{\rho_s - \rho}{\rho_m - \rho} \quad \dots\dots\dots(3.20)$$

Considerando o volume do sólido V_s e substituindo na expressão acima, tem-se:

$$V = \frac{Q_A C_A}{\rho_s} (t_E - t_C) \frac{\rho_s - \rho}{\rho_m - \rho} \quad \dots\dots\dots(3.21)$$

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:

$$H = \frac{V}{S} \quad \dots\dots\dots(3.22)$$

$$H = \frac{Q_A C_A}{S \rho_s} (t_E - t_C) \frac{\rho_s - \rho}{\rho_m - \rho} \quad \dots\dots\dots(3.23)$$

3.9 Processos para melhoria do desempenho dos espessadores

Para melhor o desempenho dos espessadores, há uma necessidade de se monitorar algumas variáveis operacionais como:

- ✓ Distribuição uniforme da alimentação;
- ✓ Diluição otimizada da alimentação;
- ✓ Consumo minimizado de floculantes;
- ✓ Espessamento aprimorado;
- ✓ Melhor controle do desaguamento e do underflow.

3.9.1 Distribuição uniforme da alimentação

Através das análises das figuras 3.24 e 3.25 de CFD (Análise Fotodinâmica Computacional) pode-se observar a distribuição de fluxo da alimentação.

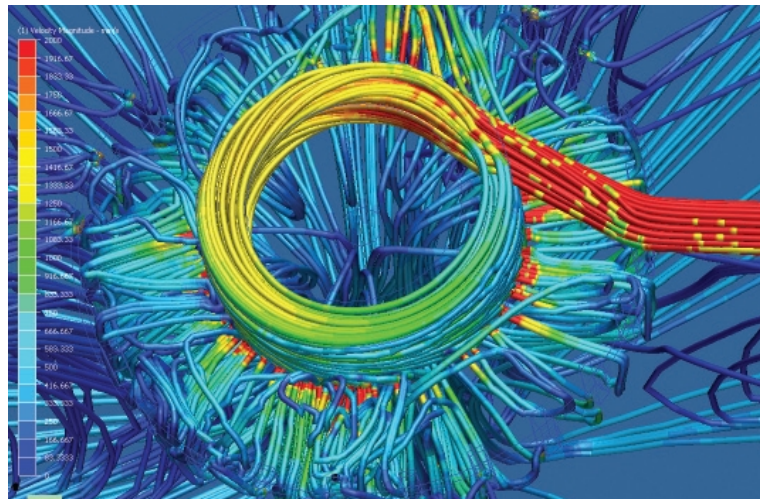


Figura 3.24: Figura representando a distribuição uniforme na área de sedimentação com o poço de alimentação EvenFlo™ (WESTECH, 2006)

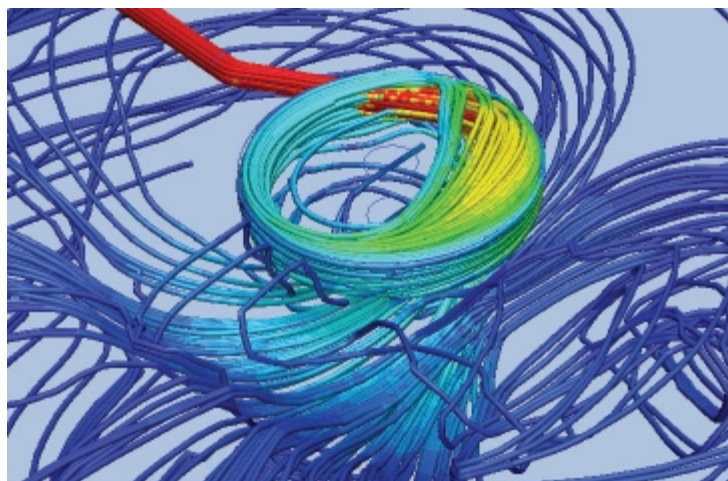


Figura 3.25: Curto-circuito na área de sedimentação com um poço de alimentação mal projetado (WESTECH, 2006).

3.9.2 Diluição otimizada da alimentação

Esta opção permite aos operadores de espessadores estabelecer uma taxa de diluição de fluxo específica com precisão controlada, sem perturbar as condições de sedimentação tranquila. A diluição adequada no poço de alimentação pode minimizar o consumo de reagentes químicos enquanto otimiza a taxa de sedimentação de sólidos.

3.9.3 Custo minimizado de floculantes

Uns grandes problemas nas usinas seria o alto consumo de floculantes. Um mau funcionamento dos espessadores seria a passagem de sólido da alimentação para o *overflow* causado pela corrente não uniforme na zona de decantação do espessador pode perturbar as condições tranquilas requeridas para uma sedimentação ideal por gravidade. Os sintomas de um poço de alimentação com distribuição não uniforme da alimentação incluem alto consumo de floculantes, problemas na clarificação do *overflow*, picos de torque causados por depósitos não uniformes de partículas grosseiras, como é mostrado na figura 3.26 abaixo:



Figura 3.26: Figura representando um curto circuito (WESTECH,2006)

Através da Análise Fluidodinâmica Computacional (CFD), representada através da figura 3.27, pode ser observada uma distribuição de alimentação não uniforme em um poço de alimentação convencional.

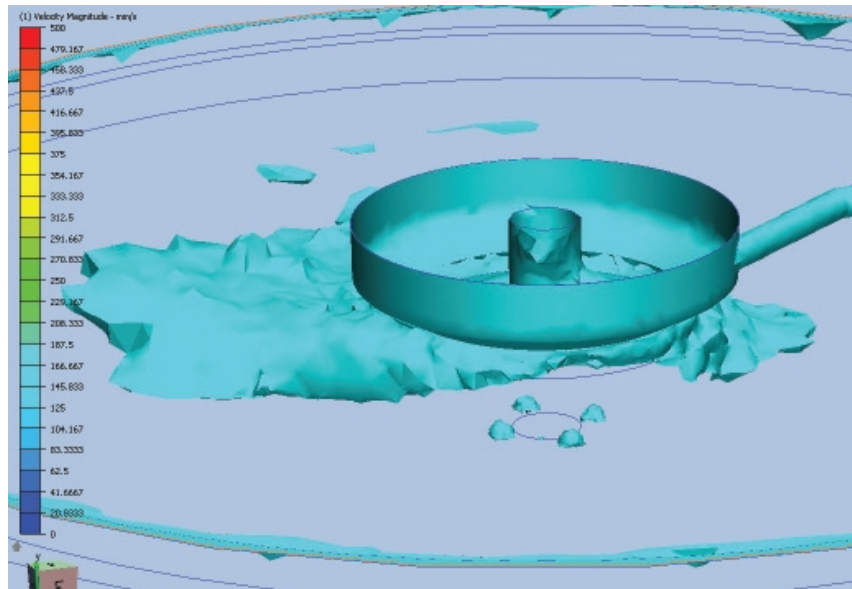


Figura 3.27: Figura representando análise fluidodinâmica computacional não uniforme (WESTECH, 2006).

Um poço de alimentação deve proporcionar dissipação de energia e distribuição uniforme do material alimentado no espessador.

Este problema pode ser resolvido através de um sistema composto por duas partes: uma câmara interna que converte a energia do material alimentado em um fluxo radial concêntrico, representada pela figura 3.28. E uma câmara principal do poço de alimentação então distribui uniformemente o material alimentado na zona de sedimentação do espessador.

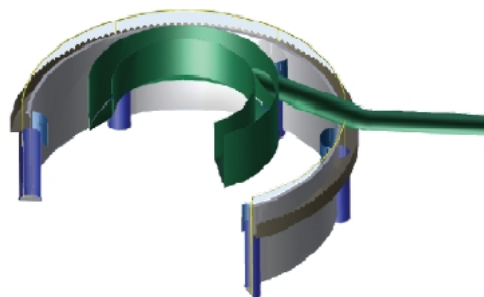


Figura 3. 28: Representação poço de alimentação EvenFlo™ (WESTECH, 2006)

Observando agora através da Análise Fluidodinâmica Computacional (CFD), da figura 3.29, pode ser observada uma distribuição de alimentação uniforme em um poço de alimentação convencional.

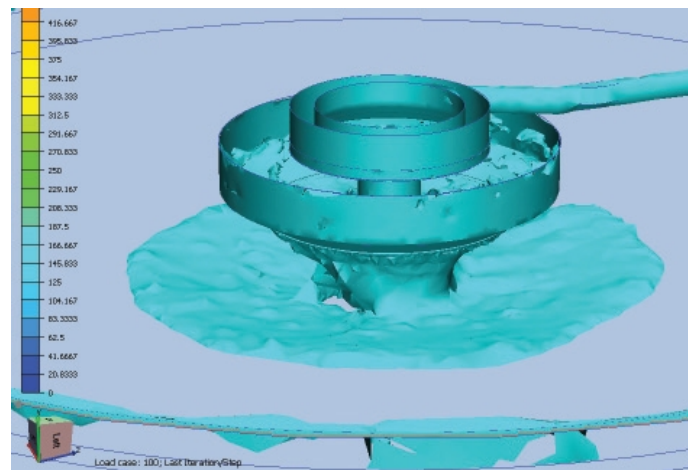


Figura 3.29: Figura representando análise fluidodinâmica computacional uniforme (WESTECH,2006)

3.10 Espessamentos aprimorados

Para que os espessadores funcionem corretamente é necessário que a alimentação seja diluída para otimizar as taxas de sedimentação e o consumo de floculantes. Sistemas de diluição projetados para captar água clarificada de um único local podem causar padrões não uniformes de fluxo na zona tranquila de sedimentação do espessador.

Sistemas de diluição operados por diferencial de densidade podem ser menos eficazes quando a densidade fora do poço de alimentação aumenta. Nenhum desses sistemas permite que o operador regule a diluição do fluxo.

Para solucionar tal problema o sistema de diluição AirLift™ da WESTECH utiliza uma bomba de ar para captar uniformemente água clarificada da superfície do espessador para dentro do poço de alimentação, como representado na figura 3.30.

A captação uniforme a partir de diversos pontos evita turbulência na zona tranquila de decantação, assegurando uma mistura adequada da alimentação / diluição dentro do poço de alimentação. A vazão de diluição pode ser regulada com precisão pelo operador através do ajuste do fluxo de ar.



Figura 3.30: Representação de um poço de alimentação EvenFlo™ com diluição AirLift™ (WESTECH, 2006)

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com este trabalho verifica-se que é extremamente importante a escolha de um espessador para a finalidade desejada. É importante conhecer as variáveis operacionais que influenciam o espessamento.

Para melhorar o desempenho dos espessadores há uma necessidade de conhecer e monitorar algumas variáveis operacionais como: distribuição uniforme da alimentação, consumo minimizado de floculantes, melhor controle do desaguamento e do *underflow*.

Os resultados apresentados nesse trabalho mostram que o processo de espessamento na indústria mineral apresenta um desempenho importante na recuperação de sólido, da água e da circulação dessa dentro da usina.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BENVINDO, A.L et al. (2002). **Tratamento de Minérios**. 3ª Edição. CETEM – Centro de Tecnologia Mineral; Rio de Janeiro-Brasil.

CHAVES, A.P.; **Teoria e Prática no Tratamento de Minérios**, v.2 p.50-116. (2004) ed. Signus / Mineral.

COE, H.S; CLEVINGER, G.H: **Methods for determining the capacities of slime settling tanks**. **Transactions of the American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers**, v.60, p.356-358; (1917).

COHEN, J.M.; HANNAH, S.A.; **Coagulation and Flocculation, In: Water Quality and Treatment**, McGraw-Hill, Nova York, 1971. Cap.3. pág. 66 a 122.

DELKOR, **Global**. Disponível em <http://www.delkorglobal.com/global/pt/278/ultrasepthickeners.aspx>. Acesso em 14 de abril de 2012.

FAUST, A. S. (1982). **Princípios das Operações Unitárias**. Rio de Janeiro: LTC.

FRANÇA, S.C.A. e CASQUEIRA, R G. **Ensaio de Sedimentação**. In: Luz, A. B., Sampaio, J. A. e Almeida, S. L. M. (Ed.). **Tratamento de Minérios**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2007, p. 406-407.

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.

McKETTA, JOHN J.; **Unit Operations Handbook**.1993, volume 1, cap.2.

METCALF; EDDY, Inc. **Waste water engineering: Treatment, Disposal, Reuse**, 2 ed. New York, McGraw-Hill, 1979, 920p

METSO MINERALS, Inclined Plate Settlers. Catálogo do Fabricante, 2006.

MOREIRA, R.F.P. M, SOARES, J.L; Notas de Aula do Curso de Engenharia Química – Departamento de Engenharia Química e Engenharia de Alimentos: EQA 5313 - **Operações Unitárias de Transferência de Quantidade de Movimento**. Santa Catarina, Brasil: Universidade Federal de Santa Catarina, 2004.

OSBORNE, D. G. **Gravity Thickening**. In: SVAROVSKY, L. (ed.). Solid-liquid separation. (2.ed.). 1981. p. 121-155.

PEARSE, M. **Gravity Thickening Theories: A Review**. Warren Spring Laboratory, Stevenage, Hertfordshire, 1977.

PINTO, T.C. S; **Aplicações de Técnicas Clássicas para Polpas não Floculadas de Dimensionamento de Espessadores Aplicadas a Suspensões de Salmoura e Lodo Biológico**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2007.107p.(Dissertação, Mestrado, Engenharia Mineral).

SHARMA, P., Hammett, G. W., Quataert, E., & Stone, J. M. 2006, ApJ, 637, 952

SOMASUNDARAN, P.; **Fine Particles Processing**; vol 2.1980, cap.6 e 10, Nova York.

TAGGART, A.F. Thickening. In: Handbook of Mineral Dressing. John Wiley and Sons, New York, 1927.

TALMAGE, W.P.; FITCH, E.B.; Determining Thickener unit areas, Ind. Eng.Chem, v.47 (1955)

VALADÃO, G E S.; ARAÚJO, A C.; ANDRADE, V L L. **Curso de Sedimentação**. Belo Horizonte: Fundação Christiano Ottoni / Cia Vale do Rio Doce, 1991.186p.

WESTECH. **Pacote de Otimização de Espessadores**. Tecnologia Avançada em Espessamento. Catalogo do fabricante, São Paulo, 2011.