

INTERFERÊNCIA DA GRANULOMETRIA NA SEDIMENTAÇÃO DE POLPAS FERROSAS¹

Filipe Augusto Vasconcelos Guimarães²
George Eduardo Sales Valadão³

Resumo

O presente artigo discute as interferências causadas pelo incremento gradual de partículas mais grosseiras às lamas de um processo a úmido de tratamento de minério de ferro. Com o deslocamento da curva granulométrica analisou-se o comportamento da sedimentação para tais polpas, e sua interferência nos dimensionamentos de espessadores industriais utilizando os métodos mais comuns para mensurar a área necessária para a decantação. A interferência do aumento da quantidade de partículas grosseiras na composição se tornou bastante claro no ato do dimensionamento pela diminuição brusca em alguns momentos das áreas necessárias para a sedimentação das lamas retiradas do processo de deslamagem de duas usinas existente no Complexo do Pico, da Vale.

Palavras-chave: Espessamento; Dimensionamento; Granulometria.

INFLUENCE OF PARTICLE SIZING IN SEDIMENTATION OF IRON ORE PULPS

Abstract

This article discusses some of the interferences caused by the gradual increase of coarse particles in the slimes of a wet process for iron ore treatment. With the shift of the grading curve, this study analyzed the behavior of settling for such pulps, and its influence in the sizing of industrial thickeners using the most common methods to measure the area required for settling. The influence of the increased amount of coarse particles in the composition became quite clear during the sizing of the thickeners. Because of that, a significant reduction was noticed in the required settling area for the slimes from the hydrocyclones separation process in two existing facilities in Pico Complex, from Vale.

Key words: Thickening; Sizing; Particle size.

¹ Contribuição técnica ao 41º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas e 12º Seminário Brasileiro de Minério de Ferro, 12 a 26 de setembro de 2011, Vila Velha, ES.

² Engenheiro de Minas M.Sc., Engenheiro Master da Vale, Projeto Serra Sul, corpo D, Eldorado dos Carajás, PA. e-mail: Filipe.Guimarães@vale.com

³ Engenheiro de Minas, Dr., Professor do Departamento de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG. e-mail: gvaladao@demin.ufmg.br

1 INTRODUÇÃO

Com o aumento da produção e com o mencionado empobrecimento das jazidas em atividade, uma relação direta é estabelecida entre a geração de novos produtos e a quantidade de rejeito gerado nas usinas atuais. Rejeitos mais pobres e processos mais eficientes passaram a dominar os temas de estudos para avanços tecnológicos no mundo atual, gerando maiores recuperações, rejeitos mais pobres, porém em maior quantidade, devido ao incremento da produção em larga escala.

Com isso, maior também é a quantidade de água necessária ao processo e maior é a quantidade de água enviada juntamente com rejeitos às barragens, causando imensos impactos ambientais e grandes gastos com a manutenção destes ativos.

1.1 Comportamentos da Sedimentação

A separação de sólidos grosseiros de uma suspensão é uma operação mais simples de conduzir do que a de partículas finas. Essa 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. Esses equipamentos, entretanto, não permitem a classificação dos sólidos pelo tamanho, mas trabalham com o princípio da diferença nas velocidades de sedimentação.

Segundo Chaves,⁽¹⁾ a velocidade de sedimentação pode ser calculada através de correlações empíricas para a decantação retardada e pelas leis de Stokes e Newton. Partículas esféricas ou com forma aproximada à esférica têm uma maior facilidade de sedimentar do que partículas de mesmo peso com formato irregular. Comportamento semelhante é observado na sedimentação de partículas de maior diâmetro, diante das muito finas. Uma alternativa à irregularidade e ao pequeno diâmetro de partículas é a floculação, que promove a aglomeração das partículas resultando em unidades maiores e com forma mais aproximada da esférica, conferindo melhorias às características de sedimentação da suspensão.

Podemos caracterizar a turbulência a que uma partícula em movimento está submetida pelo número de Reynolds:

$$Re_p = \frac{\rho_L \cdot V \cdot d_i}{\mu} \quad (1)$$

Onde:

ρ_L = densidade ou peso específico do fluido (ton/m³);

μ = viscosidade absoluta ou dinâmica do fluido (m/s);

d_i = diâmetro da partícula(m);

V = velocidade relativa partícula-fluido (kg/m.s)

Não há limites bem definidos para este número na caracterização dos tipos de regime: laminar, turbulento e intermediário. Para partículas esféricas o regime laminar (Lei de Stokes) pode ser verificado para Reynolds menor ou igual a 0,1 podendo chegar a 2,0 em condições bem controladas. O regime turbulento (Lei de Newton) estaria compreendido na faixa de valores de 500 a 1.000 até 150.000 e o regime intermediário entre eles.

No regime turbulento, nota-se que a viscosidade não apresenta um papel importante na magnitude da força de resistência. Em uma sedimentação, o balanço das forças atuantes na partícula envolverá a força peso no sentido da sedimentação, e no

sentido contrário o empuxo e a força de arraste. Quando houver igualdade na intensidade dessas forças de forma que a resultante seja zero, sua aceleração será nula e conferirá à partícula uma velocidade constante denominada velocidade terminal de queda ou sedimentação. Para partículas esféricas, a velocidade terminal será dada pela equação baseada na lei de Newton e na lei de Stokes:

Lei de Newton (regime turbulento)

$$V_s = \sqrt{\frac{4 \cdot d_i \cdot (\rho_s - \rho_p) \cdot g}{3 \cdot \rho_L \cdot C_d}} \quad (2)$$

Onde:

V_s = velocidade terminal de sedimentação (m/s);

ρ_s = densidade do sólido (t/m^3);

ρ_p = densidade da polpa (t/m^3).

Lei de Stokes (regime laminar)

$$V_s = \frac{d_i^2 \cdot (\rho_s - \rho_p) \cdot g}{18 \cdot \mu} \quad (3)$$

$$F_d = 3 \cdot \pi \cdot d_i \cdot \mu \cdot V \quad (4)$$

As polpas de minério podem apresentar um comportamento reológico newtoniano ou não, de acordo com sua relação de dependência com a viscosidade. No caso de independência, a viscosidade medida em qualquer ponto será a mesma, desde que não adicionado nenhum agente modificador, e o movimento será newtoniano. Quando for dependente a viscosidade será modificada constantemente dependendo do grau de agitação da polpa e o movimento será não-newtoniano.

Fluidização e sedimentação podem ser tratadas juntamente como uma extensão de uma camada estacionária de sólidos. A diferença é que, neste caso, as partículas estão pressionadas umas contra as outras, enquanto na fluidização e na sedimentação isso não é verdade. Hidrodinamicamente existe pouca diferença entre as duas e ambas podem ser consideradas camadas estacionárias em que as partículas são livres para se movimentarem para camadas diferentes. Fluidização e sedimentação são distinguíveis na forma que se dá essa movimentação do sólido ou do fluido.

Sedimentação, ou afundamento conturbado, essencialmente representa o oposto da fluidização. Geralmente as partículas são pequenas o suficiente para acelerarem rapidamente, igualando as forças ascensionais, e se depositarem ao fundo com a chamada velocidade terminal, porém podem existir casos de clarificação em que o sólido apresenta fases diferentes e produz interfaces importantes na determinação da velocidade de sedimentação, conforme mostrado na Figura 1.

Wills⁽²⁾ mostrou que uma pequena distribuição de partículas estiver presente, o processo será descrito pela Figura 1(b), a fase D terá uma alta proporção e uma alta

taxa de crescimento enquanto a zona C é uma fase de variada distribuição granulométrica e concentração de sólidos, porém de difícil visualização.

Quando se tem uma alta variedade de tamanhos, o comportamento da sedimentação é descrito na Figura 1(c), em que a zona C forma-se imediatamente, sem que, para isso, a zona B precise existir. No entanto, para altas concentrações de sólidos, presumindo que tenham a mesma densidade, os espaços deixados entre as partículas maiores podem ser muito pequenos, o suficiente para formar uma camada que previne a sedimentação das partículas menores e o comportamento é semelhante ao primeiro caso. Geralmente, quanto mais irregular o formato das partículas, menor a densidade da polpa e maior a probabilidade desse evento ocorrer. É chamado de travamento interno e estudos mais recentes indicam que é causado por fatores mecânicos, mas regidos por hidrodinâmicos.

A velocidade terminal é a velocidade em que as forças que atuam sobre a partícula atingem um equilíbrio e a mesma começa a sedimentar com velocidade constante. O comportamento de um sólido se movendo por fluido pode ser analisado levando em consideração a massa e a componente aceleração da partícula. O produto dessas duas variáveis será a somatória das forças existentes no sistema, ou seja, se a componente aceleração for nula, a somatória de forças será zero e a partícula terá atingido sua velocidade terminal. Isso quer dizer que, se uma partícula estiver se movendo sobre a ação de uma força externa, como a gravitacional, existirão forças como o empuxo e a força exercida pelo líquido ascendente que irão contrabalancear a resultante.

Se uma polpa composta por partículas de mesmo tamanho e densidade for colocada em um cilindro e deixada para sedimentar, como ilustrado na Figura 1(a), essas partículas provavelmente serão pequenas o suficiente para atingirem a velocidade terminal, produzindo uma interface descendente entre o líquido clarificado A e a polpa. Enquanto as partículas chegam ao fundo, surge uma interface entre o sólido sedimentado e os em processo de sedimentação. É importante ressaltar que, durante o processo, a concentração de sólidos na fase B permanece inalterada.

Eventualmente, as duas interfaces se encontrarão no ponto crítico e depois a fase D passará a sofrer os efeitos da compressão. A teoria de misturas colocou uma fronteira de atuação entre os testes de batelada e sedimentação contínua. Após este limite, os testes de batelada passam a fornecer valores sempre maiores que os dos equipamentos industriais. Sendo assim, respeitando essa fronteira, passamos a utilizar as curvas de fluxo de Kynch para determinação da área do espessador.

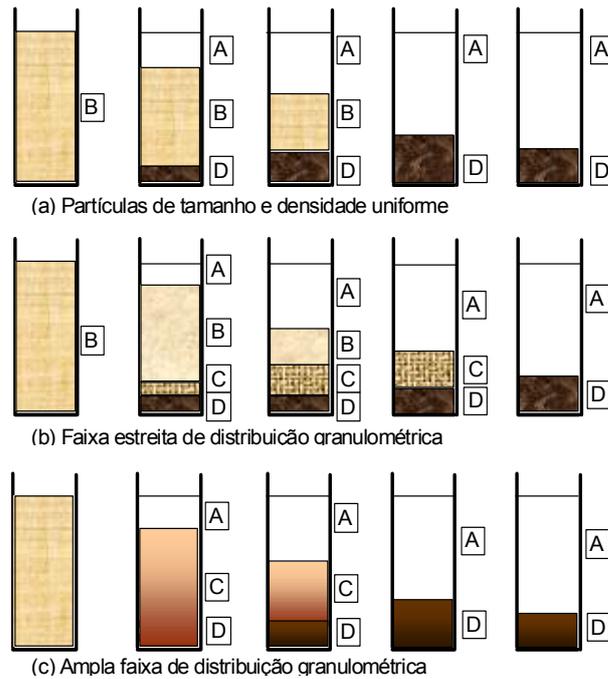


Figura 1. Teste para o comportamento de sedimentação.⁽²⁾

1.2 Fatores dos quais Dependem a Sedimentação de uma Partícula

Segundo Spottiswood,⁽³⁾ adicionalmente, mudanças de temperatura ou concentração produzem variações de densidade na água e geram corrente cinéticas ou térmicas que podem gerar curtos-circuitos hidráulicos nas unidades de sedimentação. Ao se entrar com água mais fria, a massa de água se desloca pelo fundo (Figura 2a), o inverso acontecendo ao se introduzir água mais quente ao processo (Figura 2b).

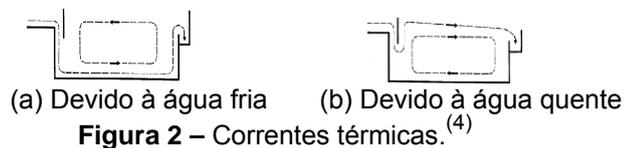


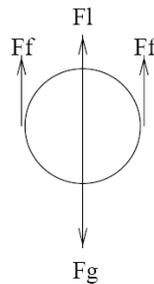
Figura 2 – Correntes térmicas.⁽⁴⁾

No caso de se variar as concentrações, se produzem correntes de densidade devido à diferença da massa de água que adentra ao equipamento e que podem criar forças de maior interferência do que as térmicas. Afortunadamente, as maiores concentrações devem estar ao fundo, no entanto, qualquer perturbação do fluxo, seja pela temperatura, obstrução ou até mesmo o simples movimento do rake pode provocar alterações no equilíbrio e produzir um fluxo sinuoso muito diferente do teórico calculado, mesmo nos sedimentadores mais bem desenhados.

As partículas em suspensão se sedimentam de diferentes formas, de acordo com sua concentração ou suas características físico-químicas, assim podemos nos referir a sedimentação de partículas discretas, sedimentação de partículas floculadas ou sedimentação livre ou interferida.

Partículas discretas são aquelas que não se alteram durante a queda (formato, tamanho ou densidade), ao contrário de partículas floculadas, que como visto, é resultado da aglomeração de partículas desestabilizadas pela ação de agentes químicos. É denominada sedimentação ou sedimentação simples aquela que ocorre com a sua totalidade de partículas discretas.

Quando existe uma baixa concentração de material, as partículas se depositam sem interferência, a este evento dá-se o nome de sedimentação livre. Em contrapartida, quando existem grandes concentrações de partículas na água, se produzem colisões que as mantêm unidas, fazendo que se depositem massivamente em um lugar único. A este processo dá-se o nome de sedimentação interferida ou sedimentação por zona. Quando temos uma sedimentação livre com partículas discretas, pode-se descrevê-la levando em consideração somente a mecânica clássica (Figura 3), pois temos apenas as características físico-químicas da partícula como agentes na sedimentação tendo como base o princípio de Arquimedes, em que o empuxo é igual à massa de água deslocada pela partícula e a força gravitacional que age sobre a partícula. Quando uma partícula discreta sedimenta livremente, a água deslocada pelo seu movimento desloca-se para cima sem causar interferências, no entanto, na sedimentação interferida, a distância entre as partículas é tão pequena que o líquido deslocado pelas partículas formam linhas ascendentes de fluxos que aumentam de velocidade a medida que o número de partículas aumenta e se interferem nos campos situados ao redor de partículas individuais. Estes fluxos não seguem linhas paralelas, sendo sua trajetória irregular o principal responsável por sua interferência na sedimentação.



Ff = força de fricção entre partículas e o fluido; Fl = Empuxo; Fg = Força gravitacional.

Figura 3 – Diagrama de forças na sedimentação de partículas discretas.

2 MÉTODOS E MATERIAIS

Existem três métodos mais comumente utilizados na indústria, são eles Talmadge e Fitch, Coe e Clevenger e Oltmann, cada um com suas peculiaridades e segundo fabricantes com benefícios e malefícios na sua utilização. Vários estudos foram conduzidos no que diz respeito ao dimensionamento de equipamentos, mas segundo Valadão e Araújo,⁽⁵⁾ nenhum deles se compara a facilidade de utilização destes anteriormente citados. Ainda como variação do mesmo tema, foi utilizado mais um método, Wilhelm e Naide, largamente utilizado na indústria, método este desenvolvido para materiais compressíveis. Para o presente estudo, foram coletadas amostras de lamelas das operações de duas instalações industriais e executados ensaios de sedimentação em provetas de 2.000 ml.

As amostras foram caracterizadas segundo sua granulometria, realizadas através de cyclosizer e Cilas, pela origem determinada pelo fluxo industrial da qual a amostra é proveniente e composição química, realizado através de Raio-X, conforme mostrado na Figura 4 e na Tabela 1.

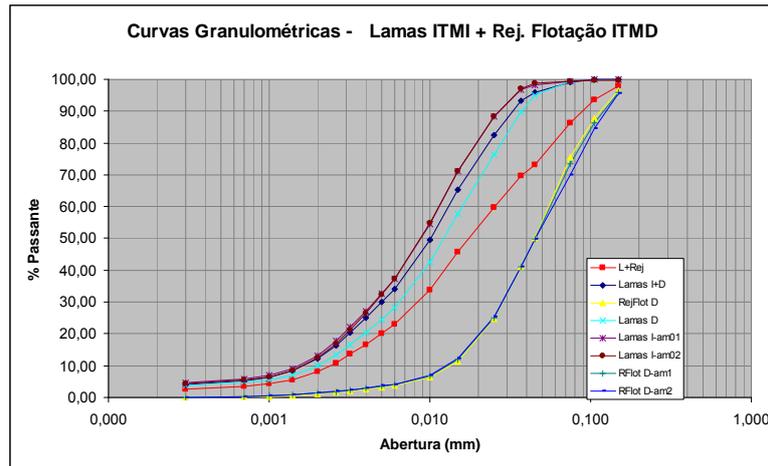


Figura 4 – Análise granulométrica.

Para efeito de comparação, foram utilizados os mesmos parâmetros operacionais de dosagem de reagentes (8 g/t), vazão de alimentação e massa alimentada para os testes e para o dimensionamento, somente variando os percentuais de sólidos das alimentações.

Tabela 1 – Análise química

Resultados Análise Química							
Lamas ITMI							
FE	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P	MN	CAO	MGO	TiO ₂
48,4	13,82	7,63	0,100	0,313	0,022	0,087	0,176
Lamas ITMD							
FE	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P	MN	CAO	MGO	TiO ₂
50,0	17,95	4,81	0,071	0,359	0,022	0,032	0,141
Lamas ITMD + Lamas ITMI							
FE	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P	MN	CAO	MGO	TiO ₂
48,7	15,66	6,76	0,089	0,324	0,022	0,063	0,160
Rejeito Flotação ITMD							
FE	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P	MN	CAO	MGO	TiO ₂
33,20	53,88	0,62	0,011	0,013	0,016	0,010	0,036
Rejeito Flotação 25% / Lamas 75%							
FE	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P	MN	CAO	MGO	TiO ₂
44,60	23,84	5,88	0,078	0,238	0,021	0,068	0,141
Rejeito Flotação 50% / Lamas 50%							
FE	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P	MN	CAO	MGO	TiO ₂
40,80	33,85	4,13	0,056	0,163	0,019	0,049	0,106
Rejeito Flotação 75% / Lamas 25%							
FE	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P	MN	CAO	MGO	TiO ₂
37,00	43,87	2,37	0,033	0,088	0,018	0,029	0,071

Através da área unitária foi determinada a área total do espessador, que, com seus devidos fatores de correção e segurança, geraram os diâmetros para cada situação proposta.

O balanço da Figura 5 foi fechado segundo as mesmas premissas de processo, com 20% de sólidos na alimentação e taxa de alimentação de 162 toneladas por hora.

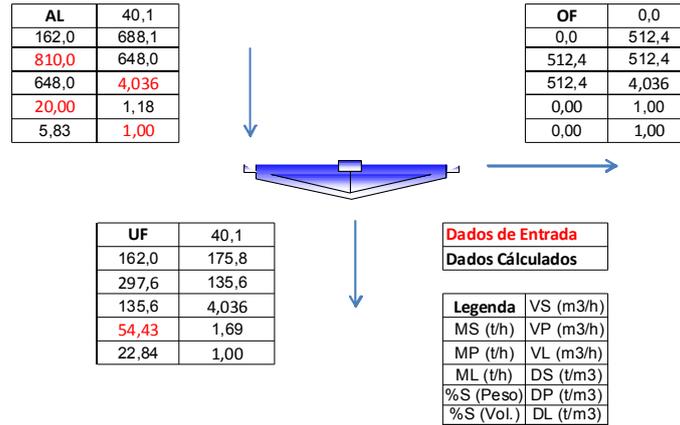


Figura 5 – Balanço de massas.

3 RESULTADOS

Através das curvas de sedimentação determinou-se as velocidades de sedimentação para cada teste e cada composição. Para os testes em questão, o rejeito de flotação apresentou velocidades de sedimentação consideráveis durante os ensaios (Figura 6).

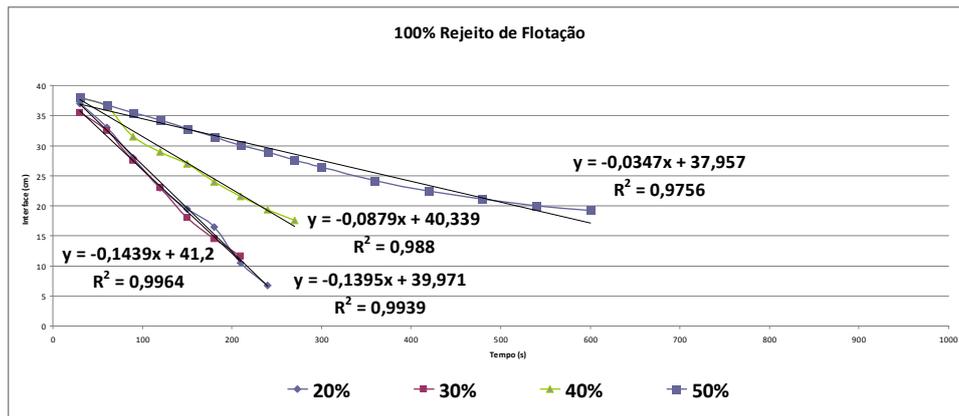
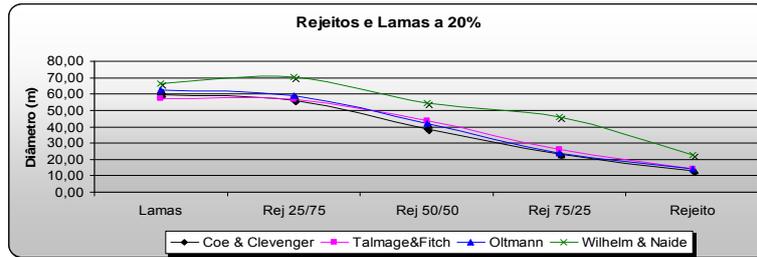
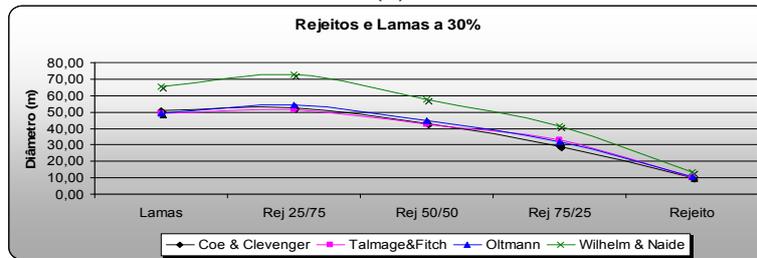


Figura 6 – Velocidade do rejeito de flotação.

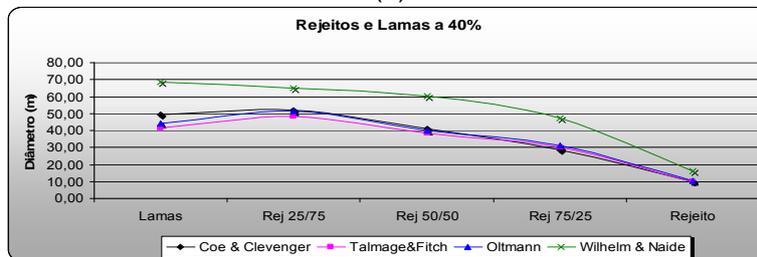
As Figuras 7 (a), (b), (c) e (d) mostram os resultados dos cálculos por faixa de concentração de sólidos na alimentação para comparação entre os métodos de dimensionamento.



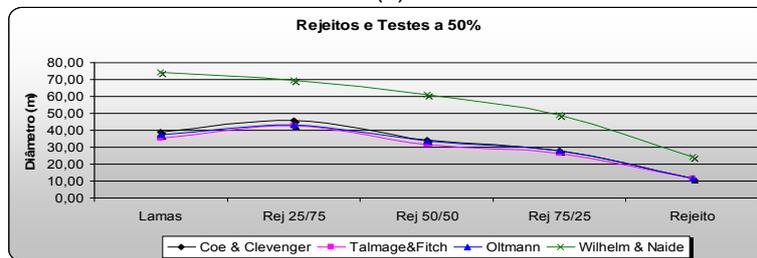
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 7 – (a) Dimensionamento para alimentação a 20% de sólidos; (b) Dimensionamento para alimentação a 30% de sólidos; (c) Dimensionamento para alimentação a 40% de sólidos; (d) Dimensionamento para alimentação a 50% de sólidos.

Conforme descrito na Tabela 2, os valores de diâmetro para cada um dos testes realizados com as misturas de lamas com rejeito de flotação.

Tabela 2 – Valores de diâmetro encontrados para misturas de lamas e rejeito

	Lamas	Rej 25/75	Rej 50/50	Rej 75/25	Rejeito
Coe & Clevenger					
20% de sólidos	59,71	56,14	38,63	23,41	13,33
30% de sólidos	51,15	52,80	42,92	28,93	9,89
40% de sólidos	49,37	52,11	40,98	28,74	9,71
50% de sólidos	38,75	45,88	34,04	27,64	11,83
Resultado	59,71	56,14	42,92	28,93	13,33
Talmage&Fitch					
20% de sólidos	57,38	56,85	43,60	26,20	14,30
30% de sólidos	49,22	51,72	42,68	32,78	10,33
40% de sólidos	41,48	48,30	38,35	30,19	9,94
50% de sólidos	35,04	42,67	31,41	26,34	11,68
Resultado	57,38	56,85	43,60	32,78	14,30
Oltmann					
20% de sólidos	62,55	59,14	41,82	24,09	14,12
30% de sólidos	49,26	54,14	44,72	31,83	10,48
40% de sólidos	44,06	51,38	39,88	31,33	10,15
50% de sólidos	37,20	43,20	33,57	28,04	11,73
Resultado	62,55	59,14	44,72	31,83	14,12
Wilhelm & Naide					
20% de sólidos	66,40	70,08	54,36	45,91	22,56
30% de sólidos	65,40	72,52	57,50	41,37	13,42
40% de sólidos	68,60	64,91	60,01	47,24	15,97
50% de sólidos	74,12	69,53	60,80	48,71	24,42
Resultado	74,12	72,52	60,80	48,71	24,42

Os valores para espessadores, considerando a taxa de alimentação operacional estão na figura 3.3, que mostra os diâmetros escolhidos para uso industrial.

4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Conforme visto na Figura 8, a área do espessador tende a diminuir devido ao tempo total de sedimentação do sólido nos testes. A redução dos tempos juntamente com o tempo de compressão da partícula, bem menor do que quando a proporção de lamas é maior, fazem com que as áreas necessárias para o espessamento sejam bem reduzidas.

A redução na área de espessamento necessária pode ser explicada pelo aumento da velocidade total de espessamento, tendo como fator principal a redução do tempo de compressão devido aos baixos volumes de compressão mostrados principalmente pelo rejeito de flotação.

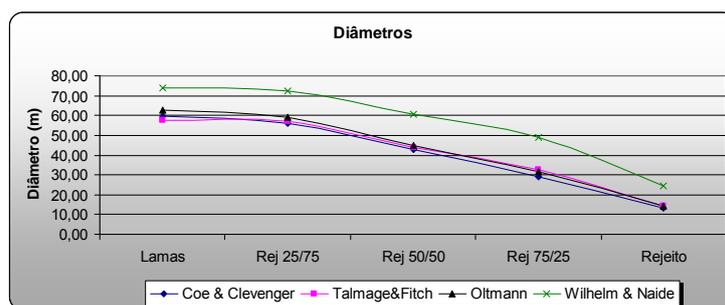


Figura 8 – Melhores resultados para todos os testes.

As áreas necessárias para deposição do material diminuíram sensivelmente, porém imputado a este fato reside diversas questões a serem respondidas. Dentre estes questionamentos está qual o tamanho da interferência gerada pela viscosidade das polpas na sedimentação e em qual fator ele mais agrega valor. Outro ponto a se observar é qual o impacto da redução da proporção de rejeito de flotação no equipamento, pois como visto na Tabela 2, muitos dos experimentos tiveram áreas aumentadas com a proporção até 25% de rejeitos, mesmo que no resultado final do dimensionamento não se note tal fato.

Como foi mostrado, os três métodos tradicionais trazem resultados semelhantes e o método introduzido para avaliação Wilhelm e Naide, forneceu resultados maiores, porém a curva segue a mesma linha de tendência, mostrando que o método fornece resultados de escolha consistentes com os outros métodos, porém superdimensionados em relação aos demais.

Não é improvável a interferência na compressibilidade dos materiais nos processos de dimensionamento de espessadores industriais, uma vez que a maioria dos métodos utilizados hoje na indústria não leva em consideração este tipo de parâmetro.

As velocidades de sedimentação dependem do potencial zeta das partículas, o que podem levar a uma maior facilidade para sedimentar devido ao alto poder de coagulação das partículas. O potencial de uma mistura é difícil de se medir devido a grande quantidade de partículas carregadas diferentemente. Os testes também sugerem uma coagulação natural mais lenta para as lamas provenientes de materiais mais hidratados e mais rápida para materiais ricos em quartzo.

5 CONCLUSÕES

As áreas necessárias para a sedimentação de grandes volumes de polpa de minério de ferro reduzem drasticamente à medida que se introduz materiais com a granulometria maior que a original. O efeito granulométrico é mais visível na sedimentação de materiais mais compressíveis e sua contribuição pode elevar as quantidades de material espessado sem a real necessidade do aumento das áreas de sedimentação. Mesmo em proporções menores, o incremento significa ganhos significativos em relação às áreas necessárias para a sedimentação.

REFERÊNCIAS

- 1 CHAVES, A.P. Teoria e Prática do tratamento de Minérios - 2ª edição – São Paulo; Signus Editora, 2002. v. 2, Cap 2, p. 289-313
- 2 WILLS, B.A. Mineral Processing Technology – 6ª edição – Camborne School of Mines, Cornwall, England; ButterWorth Heinemann, 1997. Cap 11, p. 369-392
- 3 SPOTTISWOOD, D.J.; KELLY, E.G. Mineral Processing: An Introduction to the Principles Colorado School of Mines, 1989. Cap 3, p. 330-341
- 4 NUNES, J. F.; Estudo da Sedimentação Gravitacional em Suspensões Floculentas – Dissertação de Mestrado – UFU, 2008.
- 5 VALADÃO, G.E.S.; ARAUJO, A.C. Introdução ao tratamento de Minérios – 1ª edição – Belo Horizonte – Editora UFMG, 2007. Cap 6, p. 141-152