

ANÁLISE HIDRODINÂMICA DE DISPERSÃO DE GÁS E DESEMPENHO METALÚRGICO DE CIRCUITO DE PURIFICAÇÃO DE CALCÁRIO

BRAGA, A.S.¹, SOUZA PINTO, T.C.¹, VIANA, L.O.², LEAL FILHO, L.S.¹

¹Instituto Tecnológico Vale/ITV-MI. andre.soares.braga@itv.org / thiago.souza@itv.org / laurindo.leal@itv.org

²Vale Fertilizantes. lonchanei.viana@valefert.com

RESUMO

O desempenho da flotação é influenciado por uma grande variedade de fatores, destacando-se a importância da hidrodinâmica como diretriz para o escalonamento entre laboratório e indústria. Dentro de um contexto de aprimoramento e análise de condições hidrodinâmicas de células de flotação industriais, este trabalho consiste na continuidade de estudos desenvolvidos pelo Instituto Tecnológico Vale (ITV) em parceria com a Universidade de São Paulo e Vale Fertilizantes. Tal pesquisa foi realizada no circuito de purificação de calcário da Usina 320 – localizada no complexo mineroquímico de Cajati-SP – composto por quatro células mecânicas de grande volume, Wemco-190 ($V = 42,5 \text{ m}^3/\text{célula}$), avaliando-se: i) parâmetros hidrodinâmicos de dispersão de gás (diâmetro de bolhas, velocidade superficial do gás, *hold-up* e fluxo de superfície de bolhas) em função de três velocidades de rotação dos impelidores (120, 130 e 154 RPM) e diferentes condições e tipo de coletor; ii) balanço metalúrgico do circuito industrial. Identificou-se aderência entre dados experimentais e reportados na literatura, assim como foi observado que a recuperação metalúrgica de sílica do circuito de purificação aumentou de 41% para até 67%.

PALAVRAS-CHAVE: Dispersão de gás; Hidrodinâmica de flotação; Desempenho metalúrgico.

ABSTRACT

Flotation performance is influenced by a great number of parameters, highlighting the importance of hydrodynamics as a guideline to scale up parameters from laboratory to industrial scale. This work consists in the continuation of studies developed by Instituto Tecnológico Vale (ITV) in partnership with Universidade de São Paulo and Vale Fertilizantes aiming the improvement of hydrodynamic conditions of industrial flotation cells. This research was carried out in a limestone purification circuit of Cajati-SP mining complex, composed of four large Wemco-190 mechanical cells ($V = 42.5 \text{ m}^3/\text{cell}$), evaluating: i) gas dispersion parameters (bubble diameter, superficial gas velocity, gas hold-up and bubble surface area flux) in three impeller speeds (120, 130 and 154 min^{-1}) and different conditions and types of collector; ii) metallurgical recovery of industrial circuit. Relationship among experimental and literature data was found as well as the observation of the increase on metallurgical recovery of silica in the purification circuit, rising from 41% to 67%.

KEYWORDS: Gas dispersion; Hydrodynamic; Metallurgical performance.

1. INTRODUÇÃO

A flotação é um processo amplamente utilizado para concentrar minerais, medindo-se a magnitude do grau de hidrofobicidade através do ângulo que a fase líquida forma na superfície de um sólido, ou seja, o ângulo de contato (Drzymala, 1994). No entanto, apesar de fatores termodinâmicos apresentarem relevância nos fenômenos que governam a físico-química de superfícies, a hidrodinâmica exerce papel fundamental tanto na suspensão de sólidos e homogeneização da polpa mineral quanto na eficiência dos subprocessos de colisão e preservação do agregado bolha-partícula (Ralston et al., 1999).

A qualidade da dispersão de gás em células mecânicas é geralmente determinada através de parâmetros como velocidade superficial do gás (J_g), diâmetro de bolha (d_b), *hold-up* do gás (ϵ_g) e fluxo de superfície de bolha (S_b). Assim, a determinação destes fatores pode fornecer subsídios sobre suas influências no processo de concentração, refletindo principalmente no desempenho metalúrgico da flotação (Finch et al., 2000). O J_g consiste na razão do fluxo de ar dividido pela área de secção transversal, apresentando valores na ordem de 0,7 a 2,7 cm/s para diversos modelos de células de flotação industriais (Deglon et al., 2000), destacando-se que sua magnitude é diretamente relacionada a vazão de alimentação de ar, assim como também a dispersão ao longo da célula (Gorain et al., 1996). Já o diâmetro das bolhas de ar consiste numa distribuição de tamanhos e pode ser representada pelo diâmetro médio de Sauter ($D_{3,2}$), sendo relevante sua magnitude como potencial carreador de partículas, já que uma maior quantidade de bolhas com menor diâmetro apresenta potencialmente maior área de superfície (Finch; Dobby, 1990). O diâmetro de bolhas reportado em literatura encontra-se no intervalo de 1,2 a 2,7 mm, mencionando-se que colunas geralmente apresentam diâmetros maiores que células mecânicas (Deglon et al., 2000). O *hold-up* (ϵ_g) do gás consiste no percentual volumétrico que o ar ocupa dentro da polpa de flotação, encontrando-se referência para valores que variam de 3 a 32%, segundo Deglon et al. (2000). De acordo com Vera (2002), o fluxo de superfície de bolha (S_b) recebe influência de fatores estruturais dos equipamentos como a escala e tipo de célula de flotação, considerando valores entre 50 e 120 s⁻¹.

Na mina de Cajati-SP (Usina 320) da Vale Fertilizantes, concentra-se minério de fosfato via flotação aniônica direta da apatita. O rejeito é composto predominantemente de calcita e pode ser utilizado na fabricação de cimento desde que o teor de MgO seja menor do que 5,5% (Schnellrath et al., 2002). Devido a existência de vários minerais portadores de MgO no minério como dolomita, piroxênios, flogopita e olivina (Leal Filho et al, 1993), a adequação do rejeito, quando se encontra fora de especificação, exige um segundo estágio de flotação reversa de silicatos, direcionando este fluxo para um circuito de purificação de calcário. Em estudos anteriores (Souza Pinto et al., 2015), observou-se que rotações de 120 e 130 RPM indicavam um conjunto de contribuições hidrodinâmicas favoráveis para o circuito em contraposição à então praticada velocidade de 190 RPM, aumentando a recuperação metalúrgica do processo que foi encontrada no range de 8-27% para 41%. Desta forma, uma campanha de caracterização metalúrgica completa foi realizada para se avaliar as rotações propostas, assim como foi testado um segundo coletor para se avaliar uma alternativa termodinâmica para avaliação dos seus efeitos na recuperação de silicatos na espuma de flotação.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

A amostra de minério que alimenta o banco de purificação consiste no rejeito do circuito de flotação direta de fosfatos, sendo sua composição química apresentada na Tabela 1, na qual é possível observar que o teor de MgO encontra-se acima do limite de especificação, justificando a necessidade de o rejeito ser direcionado ao segundo estágio de flotação no circuito de purificação. Já a distribuição granulométrica da alimentação encontra-se na Figura 1.

Tabela 1. Composição química média da alimentação do circuito de purificação.

Elemento	P ₂ O ₅	MgO	CaO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃
Teores (%)	0,94	6,09	44,44	2,36	6,54	0,15

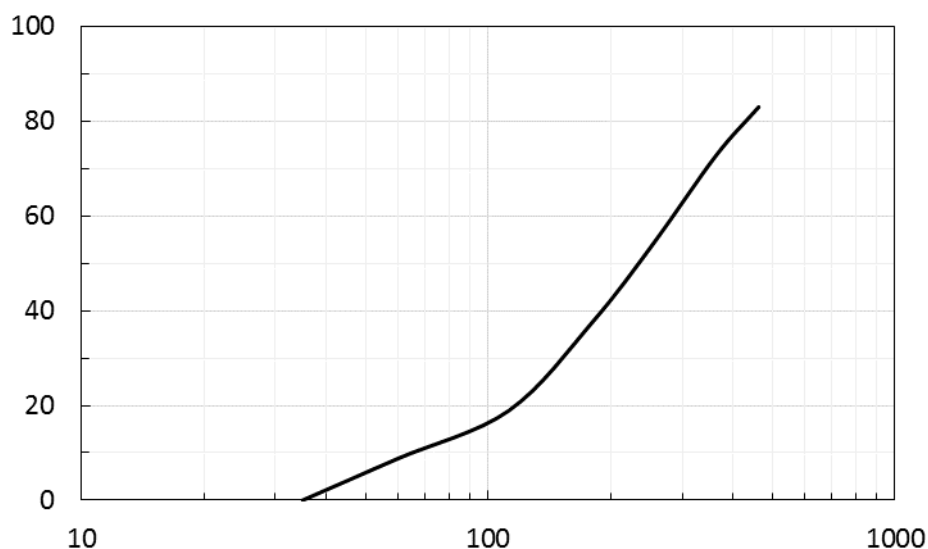


Figura 1. Distribuição granulométrica da alimentação do banco de purificação de calcário.

O banco de purificação da Usina 320 consiste num conjunto de quatro células FLSmidth, modelo Wemco-190 com volume útil unitário de 42,5m³, operando em série. O diâmetro do impelidor utilizado apresenta diâmetro de 0,99 m e sua velocidade de rotação inicial, definida por estudos anteriores (Souza Pinto et al., 2015), é de 120-130 RPM.

2.2 Métodos

Para obtenção de parâmetros de dispersão de gás, o aparato experimental utilizado para medição de J_g e $D_{3,2}$ das quatro células foi o Bubblesizer Analyser (APBS), enquanto que para a medição de *hold-up* utilizou-se a sonda McGill. A Tabela 2 exhibe as condições experimentais de cada campanha de amostragem, destacando-se que a dosagem simples consiste na inserção de 100% da dosagem na caixa de alimentação do circuito, enquanto que a dosagem estagiada consiste numa inserção de 60% na caixa de alimentação do circuito e 40% na alimentação da 3ª célula do

banco de purificação. Uma terceira condição de rotação foi proposta para que se avaliasse as condições de dispersão de gás e desempenho metalúrgico objetivando uma operação próxima aos parâmetros reportados no catálogo do fabricante. A operação do circuito industrial apresenta diâmetro do impelidor não referenciado nos dados de catálogos ($D = 0,99$ m), uma vez que o diâmetro de operação, de acordo com fornecedor, seria de 1,09 m e rotação de 140 RPM. Isto levou à estudos teóricos que permitissem avaliar qual rotação seria a mais adequada para que as condições de operação fornecidas em catálogos fossem atingidas. Assim chegou-se a magnitude para nova rotação de 154 RPM para $D = 0,99$ m.

Tabela 2 – Condições experimentais adotadas nas campanhas de amostragem.

Rotação do Impelidor (RPM)	Coletor (*)	Condição	Dosagem média (g/t SiO ₂)
120	A	Simples	3000
	A	Estagiada	
130	A	Simples	
	A	Estagiada	
154	B	Simples	3270

(*) Ambos os coletores são catiônicos da família das aminas, porém de fabricantes diferentes.

A campanha de balanço metalúrgico utilizou técnicas modernas de amostragem que permitem a avaliação dos fluxos de cada célula individualmente, tanto para identificação dos fluxos mássicos como teores dos elementos de interesse. Para execução do balanço metalúrgico completo do circuito de purificação, foram utilizados amostradores para coleta de alíquotas representativas nos pontos de amostragem ilustrados na Figura 2, realizando incrementos em intervalos de tempo pré-estabelecidos durante um período de amostragem de 3 horas. Já para balanço de massa, em cada ponto de amostragem destacado realizaram-se medidas de massa em função do tempo para estimativa da vazão de cada linha de entrada e saídas do circuito.

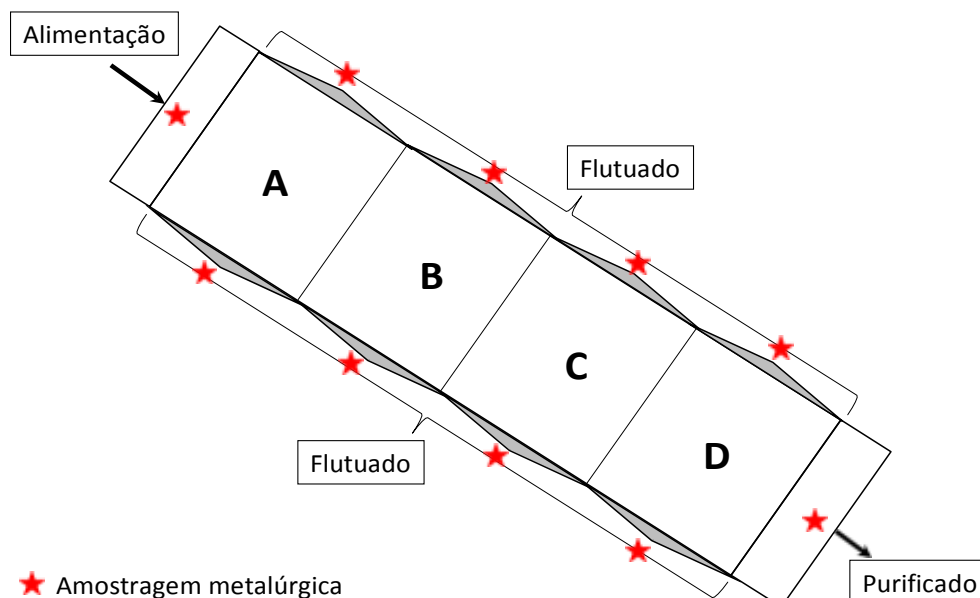


Figura 2 – Vista superior do circuito de purificação e dos pontos de amostragem para balanço de massa e metalúrgico (adaptado de Braga, 2015).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As Tabela 3 e 4 exibem os resultados de dispersão de gás determinados em cada condição experimental para as quatro células do circuito industrial. A partir dos dados apresentados, no que diz respeito a velocidade superficial do gás (J_g), observa-se que os dados experimentais aderem aos previstos pela literatura (0,5 a 2,2 cm/s). O mesmo se observa para o diâmetro de bolhas e o *hold-up* do gás, pois valores reportados na literatura são $0,8 \leq D_{3,2} \leq 2,6$ mm e $6 \leq \varepsilon_g \leq 32$ % (Yianatos et al., 2001; Deglon et al., 2000; Vera et al., 1999; Ojeda et al., 2012).

Analisando-se o comportamento da dispersão de ar em uma mesma rotação, nas condições de dosagem simples e estagiada, tanto para 120 RPM quanto para 130 RPM, não se verificam grandes modificações em termos de magnitude de J_g e $D_{3,2}$. Todavia, quando se observa em uma mesma condição de dosagem (simples), com o aumento da rotação é possível identificar um crescimento do J_g médio (0,65 → 0,80 → 1,30 cm/s) com o aumento da rotação (120 → 130 → 154 RPM), padrão de crescimento condizente com o comportamento de células de flotação auto aeradas.

Tabela 3 – Parâmetros de dispersão de gás para o banco de purificação por célula de flotação (120 RPM).

Parâmetro	Simples				Estagiada			
	A	B	C	D	A	B	C	D
J_g (cm/s)	0,6	0,8	0,7	0,5	0,7	0,8	0,6	0,5
$D_{3,2}$ (mm)	1,4	1,7	1,7	1,5	1,7	2,0	1,4	1,2
S_b (1/s)	25,7	28,2	24,7	20,0	24,7	24,0	25,7	25,0
ε_g (%)	9,0	8,0	7,0	8,0	9,0	8,0	7,0	8,0

Tabela 4 – Parâmetros de dispersão de gás para o banco de purificação por célula de flotação (130 RPM e 154 RPM).

Parâmetro	130 RPM								154 RPM			
	Simples				Estagiada				Simples			
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
J_g (cm/s)	0,8	1,0	1,0	0,7	0,7	0,8	0,7	0,7	1,2	1,7	1,1	1,2
$D_{3,2}$ (mm)	1,7	1,8	1,6	1,8	1,7	2,0	2,1	1,7	2,0	2,3	2,1	2,3
S_b (1/s)	28,2	33,3	37,5	23,3	24,7	24,0	20,0	24,7	37,0	44,7	32,2	31,8
ε_g (%)	9,0	8,0	7,0	8,0	9,0	8,0	7,0	8,0	15,0	14,0	12,0	13,0

As vazões mássicas de sólidos para as rotações de 120 e 130 RPM são apresentadas na Tabela 5, na qual se verifica que pouco se alteram as magnitudes de cada uma das linhas de saída, mesmo modificando-se a dosagem para condição estagiada. No entanto, as divergências de recuperação metalúrgica de SiO_2 são mais sensíveis e estão apresentadas na Figura 3, verificando-se que na condição estagiada para velocidade de rotação em 130 RPM apresenta recuperação metalúrgica de 43%. Os testes realizados com o coletor B, em rotação de 154 RPM

(rotação adequada segundo informações do catálogo do fabricante), foram monitorados ao longo de algumas horas de amostragem, apresentando patamar diferenciado em termos de recuperação metalúrgica de SiO_2 , alcançando valores que variam de 41-67% (média de 60%).

Estudos em escala de laboratório com o mesmo minério que alimenta o circuito de purificação, sob condições idealmente controladas, apresentam desempenho metalúrgico superior ao encontrado industrialmente, atingindo recuperações de SiO_2 na ordem de 90%. No entanto, é possível verificar que algumas condições industriais podem interferir reduzindo a recuperação metalúrgica, como por exemplo o elevado teor de sólidos na alimentação que, conforme destacado na Tabela 5 (valores entre 53-62%), apresenta magnitude prejudicial tanto à dispersão de gás quanto à hidrodinâmica da flotação (Shabalala et al., 2011; Bakker et al., 2009, 2010; Schubert, 1999).

Tabela 5 – Vazões mássicas de sólidos secos (t/h) e teor de sólidos na polpa (%) das linhas de entrada e saída do circuito industrial em dosagens simples (S) e estagiada (E).

Produto	120 RPM (S)		120 RPM (E)		130 RPM (S)		130 RPM (E)	
	(t/h)	(%)	(t/h)	(%)	(t/h)	(%)	(t/h)	(%)
Flotado A	12,8	24,4	11,5	26,2	13,8	30,6	10,4	36,4
Flotado B	10,2	31,9	10,0	33,3	11,7	31,3	10,7	39,9
Flotado C	8,9	38,2	13,3	38,7	8,9	32,7	11,4	38,8
Flotado D	7,5	38,0	9,5	33,8	10,0	34,4	12,2	37,7
Purificado	409,7	30,9	415,7	32,5	415,2	32,0	410,7	38,2
Alimentação	449,1	56,6	460,0	56,4	459,6	61,5	455,4	53,4

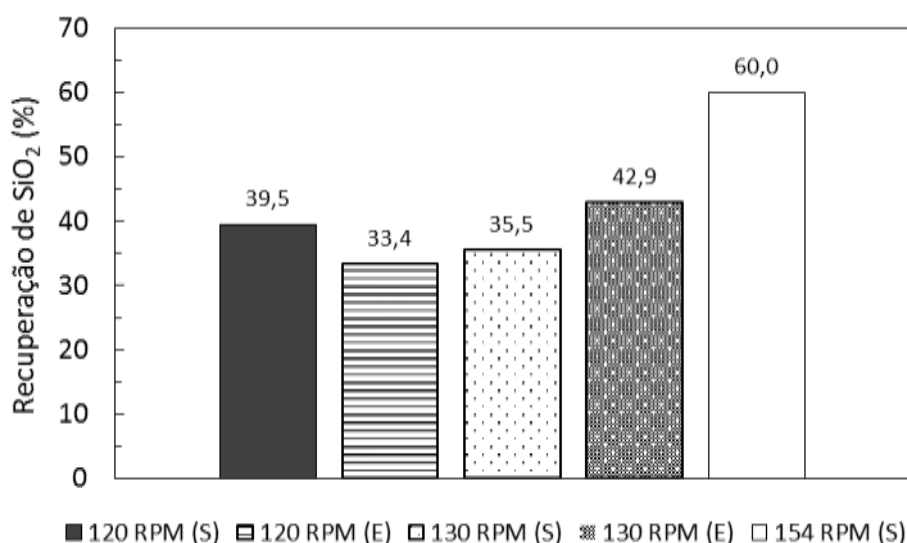


Figura 3 – Recuperação total de SiO_2 do circuito de flotação para condições de dosagem simples (S) e estagiada (E).

Avaliando-se as três rotações de estudo (120, 130 e 154 RPM), embora os valores de fluxo de superfície de bolhas ainda estejam no limiar inferior do indicado pela literatura $32 \leq S_b \leq 120 \text{ s}^{-1}$ (Yianatos et al., 2001; Deglon et al., 2000; Vera et al., 1999) deve-se considerar que na condição amostrada com coletor B e rotação de

154 RPM houve maior disponibilidade de fluxo superficial de bolhas de ar na condição de dosagem simples (média de 36 s^{-1} versus 25 s^{-1} para 120 RPM e 31 s^{-1} para 130 RPM). Entretanto, a magnitude de valores de recuperação metalúrgica encontrada com o coletor B (até 67% de SiO_2) sugerem que na substituição do reagente exista também interferência termodinâmica para justificar tal aumento, fato não observado anteriormente em condições hidrodinâmicas semelhantes (Souza Pinto et al., 2015). A continuidade das investigações se fazem necessárias para a condição de 154 RPM com o coletor A, afim de que informações qualitativas possam representar somente o efeito hidrodinâmico e de dispersão de gás do sistema.

4. CONCLUSÕES

Parâmetros de dispersão de gás foram avaliados para as quatro células do banco industrial de flotação em três rotações distintas do impelidor, sendo possível observar que os valores de velocidade superficial do gás (J_g), diâmetro de bolhas de ar ($D_{3,2}$), hold-up do gás (ϵ_g) e fluxo de superfície de bolhas (S_b) apresentam-se condizentes com os dados reportados em literatura. Além disso, a análise do desempenho metalúrgico do circuito completo em diferentes condições de operação somado à caracterização das condições de dispersão de gás para as condições propostas, possibilitou otimizar o desempenho do processo aumentando a recuperação metalúrgica de SiO_2 de 41% para até 67%.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao ITV e todo o suporte fornecido pela equipe de trabalho da Vale Fertilizantes de Cajati-SP.

6. REFERÊNCIAS

Bakker, C.W.; Meyer, C.J.; Deglon, D.A. Numerical modeling of non-Newtonian slurry in a mechanical flotation cell. *Minerals Engineering*, 22, p. 944-950, 2009.

Bakker, C.W.; Meyer, C.J.; Deglon, D.A. The development of a cavern model for mechanical flotation cells. *Minerals Engineering*, 23, p. 968-972, 2010.

Braga, A.S. Medidas de dispersão de gás em células mecânicas industriais e seus condicionantes. [Dissertação de Mestrado]. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

Deglon, D.A; Egya-Mensah, D.; Franzidis, J.P. Review of hydrodynamics and gas dispersion in flotation cells on South African platinum concentrators. *Minerals Engineering*, 13 (3), p. 235-244, 2000.

Drzymala, J. Hydrophobicity and collectorless flotation of inorganic materials. *Advances in Colloid and Interface Science*, Amsterdam, v.50, p. 143-185, 1994.

Finch, J.A.; Dobby, G.S. Column flotation. Pergamon Press, Oxford, 1990, 180p.

Finch, J.A.; Xiao, J.; Hardie, C.; Gomez, C.O. Gas dispersion properties: bubble surface area flux and gas holdup. *Minerals Engineering*, Vol 13, No. 4, p. 365-372, 2000.

Gorain, B.K.; Franzidis, J.-P.; Manlapig, E.V. Studies on impeller type, impeller speed and air flow rate in an industrial scale flotation cell. Part 3: Effect on superficial gas velocity. *Minerals Engineering*, 9 (6), p. 639-654, 1996.

Leal Filho, L.S.; Assis, S.M.; Araujo, A.C.; Chaves, A.P. Process mineralogy studies for optimizing the flotation performance of two refractory phosphate ores. *Minerals Engineering*, v.6, n.8, p.907-917, 1993.

Ojeda, R.J.M.; Lima, O.A.; Zanin, M.; Leal Filho, L.S. Parâmetros de dispersão de ar em células mecânicas de flotação em usinas brasileiras. *Revista da Escola de Minas (REM)*, 65 (2), 271-277, 2012.

Ralston, J; Fornasiero, D; Hayes, R. Bubble-particle attachment and detachment in flotation. *Int. J. of Mineral Processing.*, 56, p. 133-164, 1999.

Schnellrath, J.; Silva, A.O.; Shimabukuro, N.T. *Fosfato – Mina de Cajati – Serrana*. CT2002-187-00, CETEM, Rio de Janeiro, p. 1-13, 2002.

Schubert, H. On the turbulence-controlled microprocess in flotation machines. *Int. J. of Mineral Processing*, 56, p. 257-276, 1999.

Shabalala, N.Z.P.; Harris, M.; Leal Filho, L.S.; Deglon, D.A. Effect of slurry rheology on gas dispersion in a pilot-scale mechanical flotation cell. *Minerals Engineering*, 24, p. 1448-1453, 2011.

Souza Pinto, T.C.; Braga, A.S.; Viana, L.O.; Leal Filho, L.S. Caracterização hidrodinâmica e metalúrgica de banco industrial de flotação para purificação de calcário. In: Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa, Proceedings do XXVI ENTMME; São Paulo: Associação Brasileira de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa, 2015. v. II. p. 393-401.

Vera, M. A touch of froth: how bubble-particle aggregates take the strain. [Tese de Doutorado]. University of Queensland, Brisbane, 370p, 2002.

Vera, M.A; Franzidis, J.-P.; Manlapig, E.V. The JKMRC high bubble surface área flux flotation cell. *Minerals Engineering*, 12 (5), p. 477-484, 1999.

Yianatos, J.; Bergh, L.; Condori, P.; Aguilera, J. Hydrodynamic and metallurgical characterization of industrial flotation banks for control purposes. *Minerals Engineering*, 14 (9), p. 1033-1046, 2001.