

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais - PPGEM

**AVANÇOS NA FLOTAÇÃO DE FINOS DE MINÉRIO COM CONDICIONAMENTO
EM ALTA INTENSIDADE**

Francisco Gregianin Testa

Dissertação para obtenção do título de Mestre em Engenharia

Porto Alegre

2008

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais - PPGEM

**AVANÇOS NA FLOTAÇÃO DE FINOS DE MINÉRIO COM CONDICIONAMENTO
EM ALTA INTENSIDADE**

Francisco Gregianin Testa

Engenheiro de Minas

Trabalho realizado no Laboratório de Tecnologia Mineral e Ambiental (LTM) do Departamento de Engenharia de Minas (DEMIN) e do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGEM), como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Metalurgia Extrativa e Tecnologia Mineral

Porto Alegre

2008

Esta Dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração Metalurgia Extrativa e Tecnologia Mineral e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação.

Orientador:

Prof. Dr. Jorge Rubio
DEMIN-PPGEM- UFRGS

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Antônio Eduardo Clark Peres
DEMET – UFMG

Prof. Dr. Elvis Carissimi
ULBRA – RS

Prof. Dr. Rafael Teixeira Rodrigues
DEMIN-PPGEM-UFRGS

Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann
Coordenador do PPGEM

Aos meus pais,

Jacir Testa e Maria Oliva Gregianin Testa

AGRADECIMENTOS

Ao professor Jorge Rubio, pela amizade, confiança, e todo conhecimento repassado durante o mestrado, e os 5 anos em que estive no LTM.

A toda minha família, em especial meus pais, Maria Oliva e Jacir Testa, e meus irmãos Fernando, Maurício, Henrique, Lourenço e Guilherme.

A Roberta pelo companheirismo, apoio e paciência durante esse período.

Ao Érico, Elves, Capponi, Rafael e Rodrigo que auxiliaram na execução deste trabalho.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo auxílio financeiro.

A Bunge Fertilizantes, em especial Reinaldo Resende, pelo fornecimento de amostras e apoio técnico durante o estudo.

A todos da Universidade Federal do Rio Grande do Sul e do Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais, pela qualidade de ensino e pesquisa.

Ao Professor Rafael pelo conhecimento repassado e auxílio na pesquisa.

A todos do LTM, professores, funcionários, pós-graduandos e graduandos, grandes amigos.

SUMÁRIO

RESUMO	I
ABSTRACT	III
LISTA DE FIGURAS	IV
LISTA DE TABELAS	VIII
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1. Flotação no tratamento de minérios	3
2.2.1. Flotação de fosfatos	7
2.2. Finos (“F”) e Ultrafinos (“UF”) na flotação.....	10
2.3. Alternativas para recuperação das partículas F-UF	12
2.3.1. Flotação Extensora.....	13
2.3.2. Utilização de Bolhas com Tamanhos Intermediários.	15
2.3.4. Floculação por Cisalhamento (<i>Shear Flocculation</i>)	17
2.3.5. Flotação Transportadora e Auto Transportadora.....	18
2.3.3. Condicionamento em Alta Intensidade (CAI).....	20
3. EXPERIMENTAL.....	31
3.1 Caracterização da amostra.....	32
3.1.1 Análise Granulométrica, Química e Granuloquímica.....	33
3.2. Estudos de flotação em escala de laboratório.....	33
3.2.1. Ensaio <i>Standard</i>	34
3.2.2 Flotação com Condicionamento em Alta Intensidade (CAI).....	36
2.2.3 Avaliação da Geometria do Impelidor do CAI	38
2.2.4 Estudo da adição de partículas grossas como carregadoras no CAI.....	40
3.3. Estudo de flotação em coluna piloto de 4”	41
3.3.1. Estudos de flotação em coluna convencional reta – ensaio <i>standard</i>	41
3.3.2 Estudos de flotação com condicionamento prévio em alta intensidade – CAI	44
3.4. Estudos de flotação piloto em coluna de 24”	46
3.4.1. Ensaio <i>standard</i> (STD).....	46
3.4.2. Estudos de flotação com condicionamento prévio em alta intensidade – CAI	49
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	52
4.1. Estudo de caracterização da amostra	52

4.2. Estudo de flotação com CAI em escala de laboratório	53
4.2.1. Avaliação da geometria do impelidor no CAI -Flotação	56
4.2.2. Estudo da adição de partículas de concentrado grossas como carregadoras no CAI	58
4.3. Estudo de flotação com CAI em coluna piloto de 4”	60
4.4. Estudo de flotação com CAI em coluna de 24”	70
5. CONCLUSÕES	75
6. ESTUDOS FUTUROS.....	76
7. REFERÊNCIAS.....	77

RESUMO

As frações minerais finas (“F” 38 até 13 μm) e ultrafinas (“UF” < 13 μm) apresentam uma baixa recuperação na maioria das usinas de flotação, resultando em perdas metalúrgicas muito significativas. O condicionamento em alta intensidade (CAI) é uma alternativa promissora para aumentar a recuperação dessas frações, onde com o acréscimo de energia transferida na agitação, em condicionadores apropriados, provoca uma suspensão adequada das partículas (finas, intermediárias e grossas), uma agregação seletiva entre as partículas hidrofóbicas, além de proporcionar uma melhor dispersão de reagentes, “limpeza” das superfícies e a incorporação de bolhas na superfície mineral durante o condicionamento. Neste trabalho foi avaliado o efeito do CAI na flotação de finos de minério de fosfato, onde foram realizados estudos em escala de laboratório e piloto. Os principais parâmetros avaliados foram a intensidade da agitação, o fluxo hidrodinâmico no reator e a adição de partículas de concentrado para auxiliar na formação dos agregados entre as partículas de apatita. Os resultados obtidos mostram que com a agitação turbulenta do CAI ocorre, um acréscimo na recuperação de apatita durante a flotação, sem prejudicar o teor de P_2O_5 do concentrado. Nos estudos de laboratório foi utilizada uma coluna de flotação de 1” de diâmetro com e sem a adição de CAI, onde os melhores resultados, com ganhos aproximados de 8% na recuperação de apatita, foram obtidos após uma energia transferida a polpa (pelo CAI) de $2,5 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$, com uma redução de aproximadamente 6% no teor de P_2O_5 no concentrado. Foi observado também que o impelidor de fluxo radial apresenta um melhor rendimento que um impelidor de fluxo axial, provavelmente em função do maior número de colisões efetivas. Após os estudos de laboratório, foram realizados estudos de validação em escala piloto, em coluna de flotação (4” e 24” de diâmetro), e a recuperação de apatita aumentou, no mínimo, 2%, com a adição do regime de condicionamento turbulento, com valores de energia transferida à polpa acima de $0,23 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$ de polpa, sem diminuir o teor de P_2O_5 do concentrado. Estes resultados são provavelmente devidos aos mecanismos envolvidos nesta técnica e que dependem do grau de dispersão de polpa, da intensidade do cisalhamento e aumento da probabilidade de colisão, adesão, do teor de partículas de fosfato e da distribuição de tamanho de partículas, agregadas ou não. Os valores obtidos, em função da qualidade dos dados, permitem apoiar a inclusão de um condicionador de alta intensidade na obtenção de uma maior recuperação das partículas finas e ultrafinas de fosfato. Acredita-se que este processo

será incorporado dentro de um futuro próximo como uma tecnologia que deve diminuir em parte as perdas da flotação das frações finas e ultrafinas e um possível aumento também na recuperação global das frações grossas.

ABSTRACT

The fine mineral fractions ("F" 38 by 13 μm) and ultrafine ("UF" <13 μm) have a low recovery in most of floating mills, resulting in significant losses. The high intensity conditioning (HIC) is a promising alternative to increase the recovery of these fractions, where the addition of agitation energy, in appropriate conditioning causes a proper suspension of particles (fine and coarse), a selective aggregation between the hydrophobic particles, a better dispersion of reagents, particle surface "cleaning" and incorporation of bubbles in mineral surface during the conditioning. This work evaluates the effect of HIC in the flotation of fine phosphate ore, where studies have been conducted in the laboratory and pilot scale. The main parameters were the intensity of agitation, the hydrodynamic flow into the reactor and the addition of concentrate particles to assist in the formation of apatite aggregates. The results show that with the HIC turbulent stir there is a selective aggregation, resulting in an increase in the apatite recovery during the flotation without harming the P_2O_5 grade of the concentrate. In the laboratory, a column flotation of 1in diameter was used with and without the HIC. With HIC transferring energy to pulp at $2.5 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$, were observed gains of 8% in the apatite recovery with a reduction of 6% in the P_2O_5 grade, when compared with the studies of flotation without HIC. The flow of radial impeller presents a better performance than a impeller of axial flow. In pilot tests, with the column flotation (4 and 24in diameter) the recovery of apatite increased at least 2%, with the addition of the turbulent conditioning with energy transferred to the pulp over $0.23 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$, without lowering the P_2O_5 concentrate grade. These results are probably due to the mechanisms involved in this technique, which depend on the degree of dispersion of pulp, the intensity of the shearing and increase the collision probability, aggregation, the content of particles of phosphate and distribution of particle size, clustered or not . The results support the inclusion of a HIC for a greater recovery of fine and ultrafine phosphate particles. We believe that this process will be incorporated in the near future as a technique to decrease part of the loss of fine and ultra fine flotation fractions and also to increase the overall recovery of coarse fractions.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Fenômeno de captura bolha-partícula. (a) aproximação bolha-partícula; (b) colisão bolha-partícula; (c) indução – tempo de adelgaçamento do filme líquido; (d) ruptura do filme líquido e formação de um ângulo de contato.....	6
Figura 2. Efeito do tamanho de partícula na recuperação metalúrgica.....	11
Figura 3. Interação gota/partícula, espalhamento do óleo e formação de lente.	14
Figura 4. Adesão bolha/gota/partícula na flotação extensora.	14
Figura 5. Fenômeno de agregação entre as partículas F-UF recobertas por um filme de óleo.	14
Figura 6. Adesão por homoagregação e flotação autotransportadora.....	22
Figura 7. Adesão por heteroagregação e flotação transportadora.	22
Figura 8. Fenômeno de agregação de partículas durante estágio de condicionamento e mecanismos da flotação (Valderrama e Rubio, 1998).	23
Figura 9. Mecanismo CAI sugerido por Wei <i>et al.</i> (2006).	24
Figura 10. Fluxo provocado por impelidor do tipo axial (adaptado de Perry e Green, 1997).26	26
Figura 11. Fluxo provocado por impelidor do tipo radial (adaptado de Perry e Green, 1997).	27
Figura 12. Ponto de amostragem dos Finos Naturais na usina de beneficiamento da Bunge Fertilizantes S.A. Unidade Araxá.	32
Figura 13. Sistema experimental para flotação em coluna de minério de fosfato em nível de laboratório.....	35
Figura 14. Coluna de flotação utilizada nos estudos de flotação em laboratório.	35
Figura 15. Sistema experimental para os estudos com CAI em nível de laboratório.	36

Figura 16. Tanque de condicionamento turbulento utilizado nos estudos de laboratório, dimensões em mm.....	37
Figura 17. Vista geral do esquema experimental para os estudos com CAI em laboratório. .	37
Figura 18. Impelidor de fluxo axial tipo naval com 4 aletas, utilizado no estudo (dimensões em mm).....	39
Figura 19. Impelidor de fluxo radial tipo turbina <i>rushton</i> com 6 aletas, utilizado no estudo (dimensões em mm).	39
Figura 20. Ponto de amostragem do GCA na usina de beneficiamento da Bunge Fertilizantes S.A. Unidade Araxá.	40
Figura 21. Distribuição granulométrica da amostra do concentrado do minério de fosfato (GCA) da Bunge Fertilizantes S.A. Unidade Araxá.	41
Figura 22. Sistema experimental montado para os ensaios de flotação <i>standard</i> (STD) do minério de fosfato da Bunge-Araxa em coluna de flotação piloto de 4”.	43
Figura 23. Sistema experimental montado para os estudos de flotação do minério de fosfato da Bunge-Araxá com pré-tratamento CAI em coluna piloto de 4”.	44
Figura 24. Tanque CAI utilizado estudo de flotação do minério de fosfato da Bunge-Araxá para coluna piloto de 4” (dimensões em mm).	45
Figura 25. Tanque de CAI utilizado no estudo de flotação piloto em coluna de 4” do minério de fosfato da Bunge-Araxá.	46
Figura 26. Sistema experimental montado para os ensaios de flotação <i>standard</i> (STD) do minério de fosfato da Bunge-Araxá em coluna de flotação piloto de 24”.	47
Figura 27. Vista parcial da unidade piloto de flotação em coluna de 24” da Usina de Concentração de minério de fosfato da Bunge-Araxá.	48
Figura 28. Sistema experimental montado para os estudo de flotação do minério de fosfato da Bunge-Araxá com pré-tratamento CAI em coluna piloto de 24”.	49

Figura 29. Detalhamento do tanque CAI para estudo de flotação em coluna de 24” (dimensões em mm).	50
Figura 30. Válvulas para introdução/retirada do tanque CAI no sistema de flotação.	51
Figura 31. Distribuição granulométrica da amostra dos finos naturais dos estudos de CAI pré-flotação em nível de laboratório.	52
Figura 32. Teor de P_2O_5 , CaO, Fe_2O_3 e SiO_2 por faixa granulométrica na fração < 44 μm . ..	53
Figura 33. Efeito da quantidade de energia transferida no CAI na recuperação mássica.	54
Figura 34. Efeito da quantidade de energia transferida no CAI na recuperação de apatita.	54
Figura 35. Efeito da quantidade de energia transferida no CAI no teor de P_2O_5	55
Figura 36. Efeito da quantidade de energia transferida no CAI no teor de Fe_2O_3	55
Figura 37. Efeito da quantidade de energia transferida no CAI no teor de SiO_2	56
Figura 38. Recuperação de apatita para diferentes tipos de impelidores no CAI.	57
Figura 39. Efeito da energia transferida pelo CAI na recuperação mássica com adição de diferentes quantidades de GCA.	58
Figura 40. Efeito da energia transferida pelo CAI na recuperação de apatita com adição de diferentes quantidades de GCA.	59
Figura 41. Efeito da quantidade de energia transferida no CAI na recuperação mássica com amostra AM-01.	61
Figura 42. Efeito da quantidade de energia transferida no CAI na recuperação de apatita com amostra AM-01.	61
Figura 43. Efeito da quantidade de energia transferida no CAI no teor de P_2O_5 com amostra AM-01.	62
Figura 44. Efeito da quantidade de energia transferida no CAI no teor de Fe_2O_3 com amostra AM-01.	62

Figura 45. Efeito da quantidade de energia transferida no CAI no teor de SiO_2 com amostra AM-01.	63
Figura 46. Efeito da quantidade de energia transferida no CAI na recuperação mássica com amostra AM-02.	64
Figura 47. Efeito da quantidade de energia transferida no CAI na recuperação de CaO com amostra AM-02.	65
Figura 48. Efeito da quantidade de energia transferida no CAI no teor de P_2O_5 com amostra AM-02.	65
Figura 49. Efeito da quantidade de energia transferida no CAI no teor de Fe_2O_3 com amostra AM-02.	66
Figura 50. Efeito da quantidade de energia transferida no CAI no teor de SiO_2 com amostra AM-02.	66
Figura 51. Efeito da quantidade de energia transferida no CAI na recuperação mássica com amostra AM-03	68
Figura 52. Efeito da quantidade de energia transferida no CAI na recuperação de apatita com amostra AM-03.	68
Figura 53. Efeito da quantidade de energia transferida no CAI no teor de P_2O_5 com amostra AM-03.	69
Figura 54. Efeito da quantidade de energia transferida no CAI no teor de Fe_2O_3 com amostra AM-03.	69
Figura 55. Efeito da quantidade de energia transferida no CAI no teor de SiO_2 com amostra AM-03.	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Usinas de flotação de fosfato em operação no Brasil (Araujo <i>et al.</i> , 2005).....	7
Tabela 2. Coletores utilizados na flotação de fosfato/apatita, adaptado de Sis e Chander (2003)	8
Tabela 3. Principais estudos de flotação com condicionamento em alta intensidade (CAI) ..	21
Tabela 4. Características dos estudos de flotação com condicionamento em alta intensidade	31
Tabela 5. Concentração de reagentes e pH de condicionamento para os FN.....	34
Tabela 6. Teores (%) da amostra do concentrado do minério de fosfato (GCA) da Bunge Fertilizantes S.A. Unidade Araxá	41
Tabela 7. Análise química de Finos Naturais para estudos CAI em nível de laboratório.....	52
Tabela 8. Análise química da amostra dos Finos Naturais para o estudo de avaliação do tipo de impelidor no CAI, em nível de laboratório	56
Tabela 9. Resumo dos resultados obtidos na avaliação do tipo de impelidor no CAI.....	57
Tabela 10. Resumo dos resultados do estudo da adição de GCA.....	59
Tabela 11. Níveis das variáveis operacionais para os estudos com a amostra de polpa AM-01	60
Tabela 12. Resumo dos resultados para os estudos com CAI com amostra de polpa AM-01	60
Tabela 13. Níveis das variáveis operacionais para os estudos com a amostra de polpa AM-02	63
Tabela 14. Resumo dos resultados para os estudos com CAI com amostra de polpa AM-02	64
Tabela 15. Níveis das variáveis operacionais para os estudos com a amostra de polpa AM-03	67
Tabela 16. Resumo dos resultados para os estudos com CAI com amostra de polpa AM-03	67

Tabela 17. Níveis das variáveis operacionais adotadas nos estudos de flotação com amostra de polpa AM-04	71
Tabela 18. Teores na alimentação da amostra de polpa AM-04, %	71
Tabela 19. Resultados dos estudos de flotação com CAI com amostra de polpa AM-04	71
Tabela 20. Níveis das variáveis operacionais adotadas nos estudos de flotação com amostra de polpa AM-05	71
Tabela 21. Teores na alimentação da amostra de polpa AM-05, %	72
Tabela 22. Resultados dos estudos de flotação com CAI com amostra de polpa AM-05	72
Tabela 23. Níveis das variáveis operacionais adotadas nos estudos de flotação com amostra de polpa AM-06	72
Tabela 24. Teores na alimentação da amostra de polpa AM-06, %	72
Tabela 25. Resultados dos estudos de flotação com CAI com amostra de polpa AM-06	72
Tabela 26. Níveis das variáveis operacionais adotadas nos estudos de flotação com amostra de polpa AM-07	73
Tabela 27. Teores na alimentação da amostra de polpa AM-07, %	73
Tabela 28. Resultados dos estudos de flotação com CAI com amostra de polpa AM-07	73
Tabela 29. Níveis das variáveis operacionais adotadas nos estudos de flotação com amostra de polpa AM-08	74
Tabela 30. Teores na alimentação da amostra de polpa AM-08, %	74
Tabela 31. Resultados dos estudos de flotação com CAI com amostra de polpa AM-08	74

1. INTRODUÇÃO

Devido ao esgotamento dos jazimentos com altos teores e ao aumento do consumo de bens minerais, a indústria mineral vem sendo forçada a explorar os depósitos com baixos teores e finamente disseminados. Tal exploração vem provocando uma maior moagem para liberação dos minerais, gerando uma quantidade maior de partículas finas e ultrafinas para serem processadas.

As partículas finas e ultrafinas possuem uma baixa recuperação na flotação. Essas frações não flutam devido à baixa probabilidade de colisão das partículas finas com as bolhas (Laskowski, 2007). Ainda apresentam outros problemas, como alto consumo de reagentes e dificuldades na filtragem e espessamento. No Brasil, existem problemas com recuperação no tratamento de finos de fosfatos, zinco, ferro, ouro, carvão e cobre (Rubio, 2003; Rubio *et al.*, 2004). Vários estudos têm sido reportados (Trahar e Warren, 1976; Trahar, 1981; Fuerstenau, 1988) focando os problemas causados pelas partículas finas durante a flotação, buscando processos alternativos.

Devido à baixa recuperação milhares de toneladas rejeitos com altos teores têm sido depositados em barragens de rejeitos, gerando custos operacionais, perdas de produção e impactos ambientais.

As principais alternativas sugeridas para aumentar a recuperação dos finos podem ser agrupadas em processos que empregam uma fase orgânica, processos de flotação em coluna, os processos baseados na agregação das partículas e processos baseados na otimização de captura pelas bolhas. Dentre as técnicas baseadas na agregação das partículas destacam-se a floculação por cisalhamento, a flotação transportadora e auto-transportadora e o processo de condicionamento em alta intensidade – CAI.

O condicionamento normal da polpa, em sistemas agitados e por tempo suficiente de contato, além de suspender as frações grossas na polpa, permite aos reagentes (coletores, ativadores, espumantes, etc.) reagirem com as partículas minerais presentes no minério. O condicionamento em alta intensidade (CAI), por outro lado, rapidamente visa exceder essa transferência mínima de energia, sob um adequado aumento de turbulência ou do tempo de agitação, para que ocorra, entre outros, a agregação seletiva induzida das partículas (frações) de tamanho fino. O limite mínimo de transferência de energia depende das propriedades

superficiais das partículas finas, dos reagentes utilizados e da hidrodinâmica do sistema (velocidade de agitação, número de defletores, geometria das hélices impulsoras, etc.).

Alguns fenômenos que ocorrem com o CAI já têm sido reportados, como no caso da floculação por cisalhamento (*shear flocculation*), termo criado por Warren (1975) para a formação de agregados seletivos de partículas finas hidrofóbicas em um sistema de alta turbulência, tornando possível a concentração destas em conjunto com processos convencionais, tais como sedimentação ou flotação. Como resultado da agitação turbulenta e das colisões que ocorrem, a barreira energética resultante da repulsão entre partículas com cargas de mesmo sinal, é superada, produzindo a aproximação das partículas e a formação de agregados através do efeito hidrofóbico (interação hidrofóbica). A eficiência desse método depende de vários fatores, entre eles destacam-se a distribuição de tamanho de partículas, a carga superficial, a hidrofobicidade, o tempo de agitação e a hidrodinâmica do sistema.

Por outro lado, o processo *carrier flotation*, ou flotação transportadora utiliza partículas em um intervalo granulométrico apropriado à flotação, como transporte das partículas finas de interesse, que flutam agregadas às maiores (Greene e Duke, 1962; Chia e Somasundaram, 1983). Os agregados podem ser formados através do condicionamento em alta intensidade com partículas do próprio sistema, evitando assim dificuldades na separação do mineral do transportador, ou utilizar o próprio concentrado mineral como *carrier* (carregador).

Este trabalho teve como objetivo avaliar o efeito do condicionamento em alta intensidade nos parâmetros metalúrgicos e operacionais da flotação de finos de fosfato. Foram avaliados o efeito da geometria do sistema, a adição de partículas com alta flotabilidade e a energia transferida para polpa pelo CAI em estudos em escala de laboratório e piloto, procurando encontrar uma alternativa viável para aumentar a recuperação global e, em particular na flotação de finos de fosfato.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Flotação no tratamento de minérios

A flotação é um processo físico-químico de separação de partículas (ou agregados) de uma suspensão pela adesão a bolhas de ar. As unidades bolhas-partículas formadas apresentam uma densidade aparente menor que a do meio aquoso e ascendem (flotam) até a superfície de um reator (célula de flotação) ou interface líquido-ar, onde são removidas. Atualmente é o processo mais importante na recuperação e/ou concentração de minerais, aplicando a diferentes sistemas minerais tais como (Rubio *et al.* 2003):

- Minérios sulfetados: Cu, Pb, Zn, Mo, Fe, Ni;
- Oxi-Minerais: Óxidos de Mn, Nb, Mn, Cr, Ti, Fe, Al, Si, Argilas etc;
- Minerais semisolúveis (não metálicos, industriais): Fosfatos, CaF_2 (fluorita), CaWO_4 (schelita), Magnesita (MgSO_4), Barita (BaSO_4), Calcita (CaCO_3);
- Metais nativos: Au, Ag, Hg;
- Carvão “metalúrgico” e energético, para diminuição de impurezas de enxofre (pirita);
- Sais solúveis: KCl, NaCl;
- Beneficiamento (adequação) de matérias primas (remoção de impurezas em feldspatos, caulim, argilas para cerâmicos, tintas e outros);
- Outros: Iodo, Ácido Bórico.

No cenário mineral brasileiro atual a flotação é responsável pelo beneficiamento de minérios de ferro, fosfato, grafita, magnesita, talco, sulfetos de cobre, sulfetos de chumbo-zinco, óxidos de zinco, níquel, ouro, nióbio, fluorita, carvão, feldspato, silvita e resíduos hidrometalúrgicos contendo prata.

De Witt (1940) descreve que o processo de concentração de minerais por flotação envolve alguns passos: (a) o minério é cominuído até o estágio onde o minério de valor possa ser substancialmente separado do material de ganga; (b) o minério britado é mantido em suspensão em água e são adicionados reagentes químicos que com agitação e injeção de bolhas de ar as partículas minerais aderem as bolhas; (c) as bolhas ascendem a superfície e são coletadas pelo topo da célula de flotação.

Industrialmente o processo de flotação ocorre após o minério ser condicionado em tanques agitados onde são adicionados os reagentes necessários para promover a seletividade

do processo. A flotação é realizada de forma contínua em reatores estruturados em circuitos, os quais geram fluxogramas com etapas de reciclo dos produtos flotado e não flotado.

As células de flotação se dividem basicamente em dois tipos, mecânicas e colunas. As células mecânicas convencionais consistem de uma câmara de flotação com um sistema impeller-edutor (associado a um estator) de alta velocidade de rotação, que cisalha o ar auto aspirado formando bolhas com diâmetro entre 400 e 2000 μm . A relação volumétrica gás/água (*hold up*) pode ser incrementada pela injeção de um volume maior de ar. As principais características desse tipo de célula são o regime hidrodinâmico turbulento, a alta cinética de flotação (resultando no curto tempo de retenção) e a elevada razão gás/líquido. Já as colunas de flotação possuem uma alta relação altura/diâmetro, não possuem peças móveis e a geração de bolhas é feito através de borbulhadores situados em sua base. Possuem um regime hidrodinâmico pouco turbulento e são utilizadas principalmente para obter concentrados com altos teores.

A taxa de flotação das partículas depende da composição mineralógica do minério (alimentação), densidade da polpa, tamanho da partícula, grau de turbulência na célula, parâmetros físicos e físico-químicos, complexidade do fluxograma (tipo de células, remoagem, entre outros).

Os principais mecanismos de flotação têm sido descritos por diversos autores (King, 1982; Ek, 1992; Collins e Jameson, 1976) que demonstram que a flotação é determinada pelos sub-processos de colisão bolha-partícula, adesão e permanência. Posteriormente um modelo probabilístico, microcinético, desta tecnologia pode ser apresentado pela probabilidade de flotação, que é função da colisão/adesão entre bolha-partícula, permanência (resistência) da unidade bolha-partícula e remoção do produto flotado, de acordo com seguinte equação (Ek, 1992):

$$P_f = P_c \cdot P_a \cdot P_p \cdot P_r \quad [\text{Eq. 1}]$$

Onde: P_f = probabilidade de flotação;
 P_c = probabilidade de colisão;
 P_a = probabilidade de adesão;
 P_p = probabilidade de permanência (resistência);
 P_r = probabilidade de remoção ou coleta (do produto flotado).

A probabilidade de colisão é um subprocesso não seletivo, tanto partículas hidrofóbicas quanto hidrofílicas têm a mesma probabilidade de colisão (Collins e Jameson, 1976). Yoon e Luttrell (1989) descrevem a probabilidade de colisão entre uma bolha de ar e uma partícula (P_c) como sendo diretamente proporcional ao quadrado do diâmetro da partícula (d_p) e inversamente proporcional ao quadrado do diâmetro da bolha (d_b):

$$P_c \propto \frac{d_p^2}{d_b^2} \quad [\text{Eq. 2}]$$

Para se obter uma boa recuperação no processo de flotação devem ter uma distribuição de tamanho de bolhas adequadas com os tamanhos das partículas. Isto normalmente não ocorre nas condições atuais de flotação em usinas de tratamento de minérios e por isso, a recuperação das partículas minerais F e UF é normalmente baixa (Rubio *et al.* 2004). A adesão bolha-partícula é a etapa (microprocesso) mais importante da flotação e depende de uma série de características do sistema de flotação, incluindo tamanho de bolha, tamanho de partícula, propriedades superficiais da fase dispersa, temperatura, propriedades físico-químicas da fase contínua e condições hidrodinâmicas. A adesão bolha partícula envolve o adelgassamento laminar interferindo no filme líquido. Este fenômeno ocorre somente se a força de interação resultante entre a superfície e a bolha de ar é de caráter atrativo, condição que é determinada pela hidrofobicidade da superfície. A seqüência do mecanismo para a adesão bolha-partícula envolve (i) aproximação da partícula na bolha, (ii) adelgassamento do filme de água entre a partícula e a bolha; e (iii) o retrocesso do filme residual para gerar uma interface ar-sólido (Ahmed e Jameson, 1989). Existe a condição de ordem cinética (fundamentalmente fatores hidrodinâmicos) para que ocorra a adesão, o contato bolha-partícula deve ter tempo suficiente para que ocorra a indução, o adelgassamento do filme líquido e sua ruptura e o deslocamento do filme líquido até o ponto de equilíbrio (Schulze, 1989), esse fenômeno está representado na Figura 1.

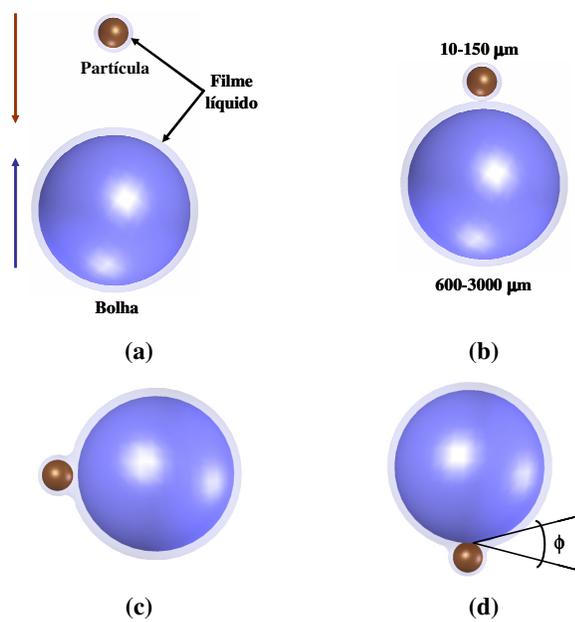


Figura 1. Fenômeno de captura bolha-partícula. (a) aproximação bolha-partícula; (b) colisão bolha-partícula; (c) indução – tempo de adelgaçamento do filme líquido; (d) ruptura do filme líquido e formação de um ângulo de contato.

A probabilidade de permanência (resistência) inclui os subprocessos que seguem à captura, ou seja, os de ascensão das unidades bolha-partícula e sua recuperação como produto flotado. Esse fator depende, portanto dos parâmetros termodinâmicos (hidrofobicidade), hidrodinâmicos (turbulência, fricção, velocidade de ascensão, densidade das partículas e aceleração das unidades bolhas-partículas) e físicos, que seriam o teor do material a ser flotado, diâmetro das partículas, diâmetro das bolhas, viscosidade e densidade da polpa.

A probabilidade de remoção das unidades bolha-partícula está relacionada com a capacidade de transferência dessas unidades ao produto flotado via coleta mecânica e (principalmente nas colunas de flotação) com a probabilidade de drenagem da espuma. A drenagem da espuma depende da estrutura da espuma (tipo de espumante), concentração de sólidos (razão água/sólidos), diâmetro das partículas de ganga e largura dos canais de drenagem. Este fator é controlado por parâmetros termodinâmicos (hidrofobicidade - ângulo de contato, ϕ), pelos diâmetros das partículas e bolhas e por parâmetros físicos, como a viscosidade-rigidez (proporção de sólidos) da espuma e a ação mecânica do raspador de espuma.

2.2.1. Flotação de fosfatos

As rochas fosfáticas (portadoras de fósforo, principalmente no mineral apatita) têm importante aplicação na fabricação de fertilizantes (Stauffer e Sulewski, 2004). Praticamente todo fertilizante fosfatado é produzido a partir de recursos minerais (Lopes *et al.*, 2004).

O material extraído das minas de fosfato é enviado às usinas de beneficiamentos onde o minério é concentrado. Lapido-Loureiro e Melamed (2007) descrevem que os processos que normalmente compreendem o beneficiamento de minérios fosfáticos no Brasil, são:

- Britagem (primária, secundária e até terciária por vezes);
- Estocagem e homogeneização;
- Moagem primária e separação magnética em baixo campo;
- Moagem secundária e classificação;
- Deslamagem;
- Concentração por flotação e espessamento.

O processo de flotação concentra o mineral apatita, através de suas características superficiais, até que o produto tenha uma qualidade adequada para sua utilização como matéria prima na fabricação de fertilizantes. Isso significa que deve ter em torno de 35% de P_2O_5 , e baixos teores de impurezas ($SiO_2 < 3\%$ e $Fe_2O_3 < 7\%$), para concentrado fino o teor de P_2O_5 tem como limite mínimo 33,5%.

No Brasil existem cinco usinas de flotação de fosfato em operação, listadas na Tabela 1. (Araujo *et al.*, 2005).

Tabela 1. Usinas de flotação de fosfato em operação no Brasil (Araujo *et al.*, 2005)

Empresa	Usina/Mina	Tipo de célula de flotação	Alimentação, t·h ⁻¹
Bunge Fertilizantes	Cajati	Mecânica e coluna	1000
	Araxá	Coluna	1500
Fosfértil	Tapira	Mecânica e Coluna	1500
	Catalão	Mecânica e coluna	1000
Copebras	Catalão	Mecânica	800

Coletores

Diferentes reagentes são empregados na flotação de fosfatos dependendo das características de cada jazimento. Os minérios de fosfato brasileiros são em sua grande maioria, provenientes em rochas ígneas, o que requerem um desenvolvimento de reagentes químicos capazes de separar o mineral apatita, a partir de um minério com diferentes minerais de ganga (Barros, 2006).

No Brasil são utilizados como reagentes de flotação os ácidos graxos como coletores (óleo de soja, arroz, *tall oil*) e amido de milho gelatinizado como depressor dos minerais de ganga. Guimarães *et al.* (2005) fizeram uma revisão dos reagentes utilizados na flotação de fosfatos de origem ígnea e as características típicas desses fosfatos, como a presença de barita que pode ocorrer associada com a apatita, requerendo uma etapa de pré-flotação da barita.

Na mineração de fosfato de Cajati-SP é utilizado um reagente anfotérico para coletar a apatita, constituído basicamente de hidroxipropil sarcosina, esse coletor promove uma seletividade particular para esse minério (Guimarães *et al.*, 2005).

Em outras minerações de fosfato no mundo são utilizados diferentes reagentes, Sis e Chander (2003) listaram os coletores de apatita adaptado na Tabela 2.

Tabela 2. Coletores utilizados na flotação de fosfato/apatita, adaptado de Sis e Chander (2003)

Propriedade Iônica	Coletor
Aniônico	Ácido oléico
	Ácidos graxos
	Disódio dodecil fosfato
	Sulfonato de alizarina sódico
	Sulfonatos e fosfatos etoxilados
	Hidroxamatos
	Sulfosuccinato, sulfosuccinamato
Catiônico	Armac T amina
	<i>Tallow amine acetate</i>
Anfotérico	Sarcossinatos
	Atrac 1562

Apesar de no Brasil não utilizado óleos combustíveis como agentes extensores na flotação de fosfatos, esses óleos são muito utilizados em outras regiões, com objetivo de aumentar o ângulo de contato entre as bolhas e as partículas. As indústrias mineradoras de fosfatos da Flórida (Estados Unidos) consomem 150 milhões de toneladas de óleo combustível por ano (Zhang *et al.*, 2008).

Em estudo da utilização da mistura de ácido graxo com óleo combustível, Gruber (1999) apresenta a quimissorção como sendo o mecanismo de adsorção dos reagentes na superfície do fosfato e quartzo.

Outras rotas de flotação são aplicadas a minérios fosfatados, como no processo *Craigo* “*double float*” utilizado nas jazidas de fosfato da Flórida Central. Consiste em uma primeira flotação com ácido graxo e óleo combustível onde a apatita é flotada em uma etapa *rougher*, esse concentrado recebe uma escrubagem ácida com ácido sulfúrico a fim de remover o coletor das partículas. Após é realizada uma etapa *cleaner* de flotação com coletor catiônico (amina), retirando a sílica do concentrado (Sis e Chander, 2003).

Depressores

Como depressor dos minerais de ganga na flotação de fosfatos é utilizado o amido de milho gelatinizado em todas as plantas concentradoras de fosfato do Brasil. As aplicações do amido de milho como depressor na flotação no Brasil foram listadas por Peres e Correa (1996) como sendo:

- i. Depressor de óxidos de ferro na flotação catiônica (utilizando amina como coletor) reversa de itabiritos;
- ii. Depressor da ganga (minerais carbonáticos e ferrosos) na flotação aniônica direta de fosfatos (utilizando ácidos graxos) produzindo concentrados de apatita
- iii. Depressor de ganga (argilominerais) na flotação direta de minério de silvinita com amina, produzindo concentrados de KCl.
- iv. Depressor de ganga (hiperstênio, silicato de ferro e magnésio) na flotação direta de sulfeto de cobre com tio coletores.

Na avaliação do amido de milho na flotação de fosfatos de Guimarães *et al* (2005) foi observado que a alta concentração de óleo contida no amido não inibe a formação da espuma, inclusive quando o amido é utilizado com coletores iônicos também apresenta características espumantes.

A habilidade de depressar do amido de milho parece estar relacionados à compatibilidade estérica entre as posições de cátions que estão presentes na superfície mineral e grupos hidroxila da estrutura molecular do reagente (Leal Filho *et al.*, 2000).

Além do amido de milho, outros depressores são utilizados em plantas concentradoras de fosfato. Quando o beneficiamento do fosfato é realizado via flotação reversa utilizando amina como coletor, o ácido fosfórico e seus derivados são amplamente utilizados para inibir a apatita, enquanto silicato de sódio e goma arábica são utilizados como depressores de ganga na flotação direta (Sis e Chander, 2003).

2.2. Finos (“F”) e Ultrafinos (“UF”) na flotação

As partículas finas (“F” 40 até 13 μm) e ultrafinas (“UF” < 13 μm) de minério sempre representaram um problema para a indústria mineral. No processo de concentração por flotação as partículas com granulometria entre 10 μm e 100 μm geralmente apresentam as melhores recuperações, variando esse tamanho ótimo para diferentes sistemas minerais (Subrahmanyam e Forssberg, 1990; Laskowski, 2007). Este efeito pode ser visto na Figura 2 que mostra a influência do tamanho de partículas na recuperação metalúrgica no processo de flotação. Esse comportamento ocorre em todos os sistemas minerais, já relatado por diversos estudos (Pease *et al*, 2005; Tabosa, 2007; Matiolo, 2005; Capponi 2005).

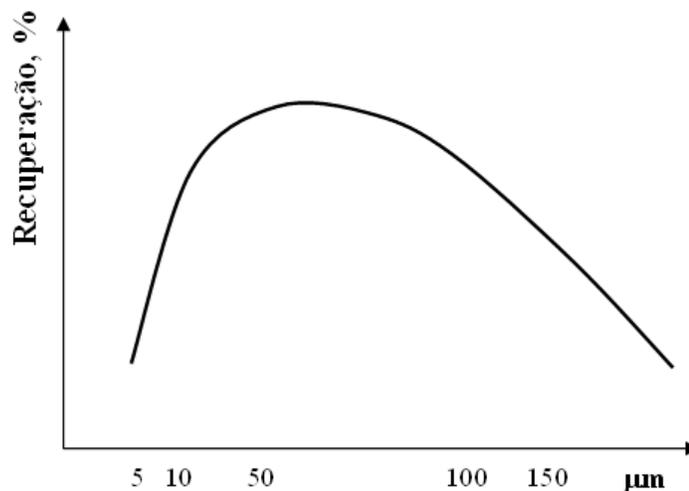


Figura 2. Efeito do tamanho de partícula na recuperação metalúrgica.

Ainda há o problema da flotação de finos e ultrafinos junto com partículas grossas, onde os finos prejudicam a recuperação de partículas de melhor flotabilidade, tornando-a ineficiente por fenômenos que derivam de suas características intrínsecas como pequena massa, alta superfície específica e alta energia superficial (Capponi, 2005). Na indústria normalmente é realizada uma deslamagem prévia à flotação, onde as lamas ($< 5\mu\text{m}$) são retiradas do circuito para não interferirem na flotação. Essas lamas, mesmo podendo conter altos teores, são descartados em barragens de rejeitos. Também tem se mostrado eficiente e usual na indústria separar nos circuitos de beneficiamentos as correntes de grossos e finos, e tratá-las separadamente.

As dificuldades com a flotação de finos já foram relatadas por Collins e Jameson (1976), que analisa as etapas de colisão bolha/partícula, adesão e destacamento.

Os problemas existentes na flotação com partículas F-UF são mostrados por Pease, *et al.* (2005):

- Partículas F-UF possuem uma alta área superficial por unidade de massa, o que acarreta em um maior consumo de reagentes;
- Partículas pequenas possuem baixo *momentum*, o que facilita o arraste hidrodinâmico pelas linha de fluxo de água, e leva a uma menor energia de colisão com as bolhas de ar;

- Frações finas são mais passíveis ao mecanismo de *slimes coating* (recobrimento por lamas), ou devido à sua alta área superficial fazendo-as assim mais reativas; ou talvez pelo seu baixo *momentum*, significando uma diminuição na limpeza superficial pelo mecanismo de atrição com outras partículas;
- F-UF tendem a serem mais afetados por íons em solução presentes na água de processo;
- A alta área superficial leva à formação de espumas mais resistentes e a filtragem é mais difícil;
- A cinética de flotação para as frações F-UF é via de regra menor do que das partículas de tamanho médio. Essas frações podem flotar com bolhas grandes, porém o uso de bolhas pequenas aumenta a taxa de flotação.

Além desses fatores também são reportados problemas como dificuldade para superar a barreira energética entre as partículas, arraste mecânico (arraste e aprisionamento) (Smith e Warren, 1989), rigidez da espuma e falta de seletividade na adsorção de reagentes (Brum *et al.* 1997).

2.3. Alternativas para recuperação das partículas F-UF

Quando o minério possui um alto grau de liberação não é necessária uma moagem fina, sendo possível reduzir a geração de finos otimizando a moagem e classificação evitando perdas nos processos subsequentes. Porém, se o mineral de valor está disseminado na rocha é necessário moer até obter frações finas para que haja a liberação. Ainda em determinados sistemas minerais existem os finos primários, comuns em minérios não metálicos e minerais oxidados, não sendo possível reduzir a geração dessas frações.

Diversos autores estudaram meios de aumentar a recuperação das frações finas na flotação de minérios. Várias técnicas foram desenvolvidas baseadas no aumento da distribuição do tamanho de bolhas e no aumento do tamanho das partículas, via agregação.

Uma ampla distribuição de bolhas na flotação seria mais apropriada para uma maior recuperação das partículas finas, porém em células mecânicas existe uma grande dificuldade em gerar bolhas com baixo diâmetro. Na flotação em colunas o sistema de geração de bolhas é bastante estudado principalmente por existirem problemas operacionais como entupimento nos aeradores internos e desgaste quando utilizado recirculação de polpa (Takata, 2006), e não visando aumentar a distribuição de bolhas.

Como alternativas de agregação estão a adição de óleos não polares, flotação extensora, e em um menor “perfil” floculação por cisalhamento (*shear flocculation*), floculação seletiva, flotação transportadora e auto transportadora, floculação magnética, flotação com reciclo de concentrado.

A adição de óleos na flotação visa aumentar a hidrofobicidade e o tamanho das partículas através de processos de agregação, facilitando a captura desses agregados pelas bolhas de ar (Capponi, 2005). As técnicas com adição de óleos não polares são classificadas de acordo com a concentração de óleo adicionada (Rubio, 2003 e Rubio *et al.*, 2007).

2.3.1. Flotação Extensora

A flotação extensora ou *extender* utiliza óleos não polares para provocar uma agregação hidrofóbica e com isso aumentar a recuperação. Os óleos (diesel, querosene, entre outros) são utilizados em diversas plantas de flotação, em sistemas de Cu e Cu/Mo (Rubio *et al.*, 2007; Testa *et al.* 2008; Capponi, 2005; Gorodetskii *et al.*, 1973; Bos e Quast, 2000), minério de ferro (Araujo *et al.* 2005), carvões (Rubio, 1988; Laskowski, 1992). A flotação de carvão ilustra bem o benefício do efeito hidrofóbico pretendido com a adição de óleos. Os carvões, em geral, correspondem a partículas com uma determinada hidrofobicidade natural, devido a isso muitas dessas partículas flutam sem a utilização de coletor e somente com espumantes. Com a oxidação parcial essa hidrofobicidade diminui e por isso é adicionado o óleo (Rubio, 1988; Laskowski, 1992 e Capponi, 2005).

Os óleos são insolúveis em água, sendo assim a dispersão deles para a superfície das partículas é governada pela a agitação do sistema e a forma de adição. A adição do óleo na forma emulsificada favorece a difusão das “gotas” do óleo de uma maneira mais rápida e uniforme. Estudos feitos com óleo emulsificado mostram um ganho significativo na recuperação Dmitreva *et al* (1970) obtiveram um incremento de 5% na recuperação de calcopirita com a adição de diesel emulsificado. Um estudo detalhado com minério de Cobre e Molibdênio, apresentado em Capponi (2005) e Rubio *et al.* (2007), mostra um ganho de 4,6 % na recuperação real de cobre e 6% na recuperação metalúrgica de molibdênio utilizando 90g/t de diesel emulsificado.

Os mecanismos que ocorrem com a adição de óleo reportados (Laskowsky, 1992; Capponi, 2005; Rubio *et al.*, 2007) mostram que a interação do óleo com as partículas, já

hidrofobizadas devido à adição de coletor, ocorre devido as forças hidrofóbicas (Figuras 3 e 4). Após ocorrer a adesão do óleo nas partículas a gota se espalha pela superfície da partícula aumentando sua hidrofobicidade. Este fenômeno de espalhamento é o que lhe dá o nome de “extender” à técnica e tem o sentido de extensão de uma película superficial.

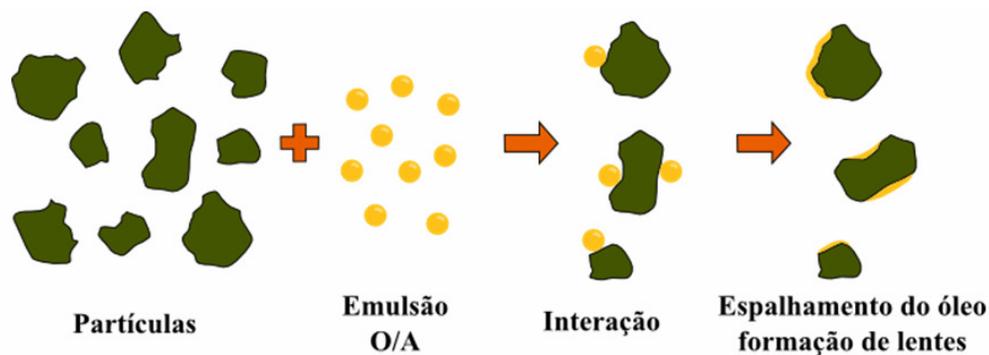


Figura 3. Interação gota/partícula, espalhamento do óleo e formação de lente.

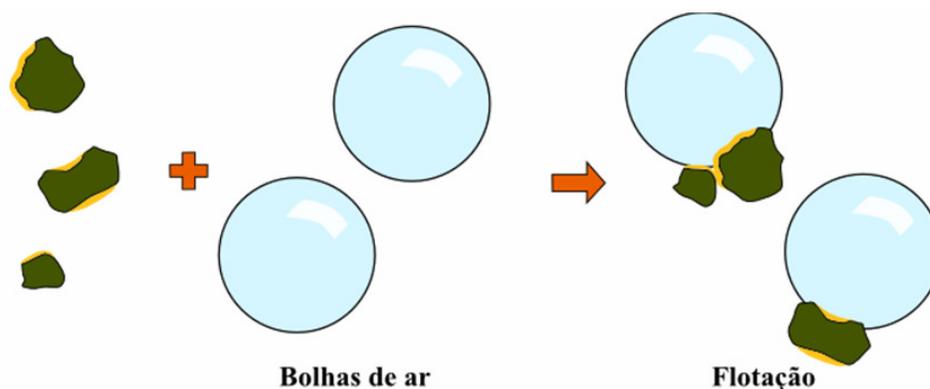


Figura 4. Adesão bolha/gota/partícula na flotação extensora.

Outro mecanismo provável colocado por Capponi (2005) é o aumento do tamanho de partículas via interação hidrofóbica entre as próprias partículas (homoagregação) conforme mostrado na Figura 5.

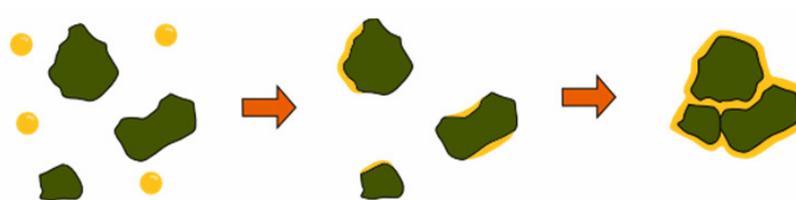


Figura 5. Fenômeno de agregação entre as partículas F-UF recobertas por um filme de óleo.

A adição de óleo também é utilizada na técnica de geração de bolhas oleosas, onde as bolhas de ar estão cobertas por uma fina camada de óleo contendo coletores solúveis em óleo. As bolhas oleosas teriam um ângulo de contato muito maior, assegurando uma elevada força de adesão, permitindo com isso a flotação de partículas grosseiras a finas. Este modelo eliminaria ainda a necessidade de diluição de coletores na fase aquosa, evitando interações indesejadas entre coletores, ativadores, depressantes e dispersantes presentes no sistema (Capponi, 2005).

Como desvantagens da técnica são observadas o abatimento da camada de espuma e possíveis dificuldades na filtragem com a adição de óleo, além da preocupação com a contaminação das águas, caso o óleo não fique totalmente aderido nas partículas e levado ao concentrado.

2.3.2. Utilização de Bolhas com Tamanhos Intermediários.

Outra alternativa para recuperar as partículas F-UF é utilizar bolhas mais finas que as geradas nos equipamentos de flotação. As bolhas geradas nas células convencionais, dependendo da tensão superficial líquido/ar, variam de diâmetro no intervalo de 600-2000 μm , podendo ser um pouco menores em colunas, e não são eficientes na coleta das frações F-UF. As alternativas neste sentido têm por meta ampliar a distribuição de tamanho das bolhas gerando frações com bolhas com diâmetros entre 300-600 μm ou menores. Os fundamentos de apoio a esta alternativa são baseados no aumento da probabilidade de colisão e adesão entre partículas e bolhas finas. Ainda esta técnica visa aumentar o valor de S_b , o fluxo superficial de bolhas, ou taxa de área superficial de bolhas por área de seção de equipamento.

Rodrigues (2004) relata a importância do tamanho de bolhas nos processos de flotação, como sendo uma das variáveis físicas de maior impacto na flotação, afetando, principalmente, a eficiência de captura de partículas pelas bolhas e o *hold up* de ar.

As bolhas podem ser classificadas segundo seu diâmetro em microbolhas, bolhas intermediárias e bolhas grandes, essas últimas sendo as normalmente geradas nos equipamentos de flotação.

As microbolhas possuem uma distribuição de diâmetro entre 30-100 μm e são geradas através da depressurização de água saturada. Normalmente se utiliza um vaso saturador onde

a água é saturada em ar a uma pressão de 3 a 6 $\text{kgf}\cdot\text{cm}^{-2}$. Também existe um tipo específico de bomba multifásica que gera bolhas, na faixa de tamanho das microbolhas, através da cavitação no seu rotor, ou ainda mediante eletrólise de soluções aquosas salinas, neste caso o processo é conhecido como eletroflotação e as bolhas (H_2 e O_2) são extremamente pequenas, menores que 30 μm .

A utilização de bolhas de ar dissolvido na flotação já é utilizada e bastante conhecida para tratamento de água. Rodrigues e Rubio (2007) fizeram um levantamento do potencial da utilização da flotação por ar dissolvido (FAD) na indústria mineral. A técnica é utilizada em separações sólido-líquido, remoção de íons em águas de processo, tratamento de drenagens ácidas de mina,

A geração de bolhas com tamanhos médios, entre 100-600 μm , é possível através da aeração de soluções contendo concentrações baixas de espumantes (tensoativos). Um exemplo deste sistema é o gerador de bolhas da coluna Microcell da Virginia Politechnic. A célula Jameson, de acordo com várias publicações (Rodrigues e Rubio, 2003; Clayton *et al.*, 1991), também gera uma alta proporção de bolhas < 600 μm . As células Jameson têm mostrado que o uso destas bolhas pequenas pode aumentar em 10-100 vezes a velocidade de coleta de partículas F-UF (Finch, 1995; Honaker e Mohanty, 1996 e 1999). Outro exemplo é a utilização de colunas de flotação com tamanho de bolhas controlado. Neste caso, o objetivo é aumentar as probabilidades de adesão e a estabilidade das unidades partícula-bolha. Existem colunas com controle de tamanho de bolhas através de sistemas auto-aspirados, placas, venturi, injeção de tensoativos, etc.

As maiores vantagens observadas em minerais “leves”, como carvão, são a economia de capital e de custos operacionais, assim como melhor desempenho metalúrgico. Este último fator é importante principalmente na seletividade alcançada. A eficiente drenagem, realizada com a adição de água de lavagem dentro da zona de espuma, elimina efetivamente o arraste hidráulico das partículas de ganga. Este, associado ao contato em contracorrente entre as bolhas de ar e a polpa e às condições de fluxo mais tranquilas (devido à ausência de agitação mecânica), fazem da coluna um equipamento eficiente para a separação de uma boa proporção de partículas finas hidrofóbicas.

Em resumo, existe respaldo teórico sobre as vantagens do uso de bolhas menores que as geradas em células agitadas convencionais e que esta alternativa, portanto, apresenta um bom

potencial. A forma de aumentar S_b e a distribuição de tamanho das bolhas é possível pela injeção de bolhas pequenas e médias ou através do uso de equipamentos que as gerem ou “contactores” externos.

2.3.4. Floculação por Cisalhamento (*Shear Flocculation*)

Floculação por cisalhamento é a agregação de partículas finas após hidrofobização pela adição de reagentes em um regime convenientemente agitado, normalmente observado em finas partículas suspensas em uma solução aquosa (Ozkan *et al.*, 2006). Este processo é baseado na agregação seletiva das partículas hidrofóbicas em um sistema de alta turbulência (Valderrama e Rubio, 1998, Valderrama *et al.*, 1994) com objetivo de formar agregados seletivos, tornando possível a concentração dos finos em conjunto com processos convencionais, tais como sedimentação ou flotação (Rosa, 1997).

Warren (1975) estudou detalhadamente, em um sistema scheelita e oleato de sódio, o efeito de agitação turbulenta na formação de agregados através de interações hidrofóbicas. Ele criou o termo “shear flocculation” para distinguir o efeito de outros como: coagulação por eletrólitos ou floculação por polímeros. Koh e Warren (1979) definiriam que o objetivo de aplicar floculação por cisalhamento em partículas ultrafinas é aumentar o tamanho efetivo dessas partículas.

Nos estudos de Warren (1982) com partículas de scheelita o autor concluiu que:

- As partículas devem ser hidrofóbicas para ocorrer a agregação;
- Uma energia de colisão mínima é necessária para iniciar o processo de agregação, uma vez que as partículas estão carregadas e necessitam vencer uma barreira de energia de repulsão, para que ocorra o efeito hidrofóbico;
- Os agregados formados são mais resistentes do que aqueles obtidos nos processos de coagulação ou floculação, sendo que os últimos tendem a quebrar quando submetidos a altas agitações (cisalhamento).

O fato das partículas, que se deseja agregar, estarem hidrofobizadas sugere que a interação entre as mesmas é, principalmente, de natureza hidrofóbica (Tabosa, 2007). O conceito de hidrofobicidade está ligado à molhabilidade de uma superfície pela água e à sua polaridade. Partículas mais hidrofóbicas são mais apolares e menos ávidas pela água (polar) e

possuem mais afinidade por reagentes como óleos e pelo ar (apolares). Quando duas partículas, hidrofobizadas pela adsorção de reagentes, colidem e aderem, parte da interface entre as cadeias de hidrocarboneto e a solução aquosa desaparecerá para ser substituída por uma área de contato entre as cadeias de hidrocarbonetos, desta forma reduz-se a energia superficial do sistema (Ozkan *et al.*, 2006).

Lu e Dai (1988) sugerem que há duas razões para a interação hidrofóbica entre partículas hidrofobizadas pela adsorção de reagentes. A primeira é o efeito da repelência da água que força as partículas hidrofóbicas a se agregarem que é causada pela perturbação da estrutura da água nas vizinhanças das partículas hidrofóbicas (efeito entrópico). A outra razão é a associação hidrofóbica das cadeias orgânicas dos surfatantes adsorvidos entre as partículas.

Gräsberg e Mattson (1979) citam como exemplo de aplicação industrial de floculação por cisalhamento o processo empregado na mina Yxsöberg de scheelita situada na Suécia, em que as partículas finas de minério são recuperadas por flotação após a agregação seletiva.

2.3.5. Flotação Transportadora e Auto Transportadora

O processo de flotação transportadora (*carrier flotation*) consiste na aplicação prática do conceito de floculação por cisalhamento em conjunto com uma separação por flotação, onde as partículas com alta flotabilidade são utilizadas para como carregadoras de partículas com menor flotabilidade, como finos e ultrafinos.

Rubio e Hoberg (1993) desenvolveram um processo especial de flotação transportadora que utiliza partículas plásticas poliméricas como transportador. Esse processo é baseado na adesão seletiva de partículas minerais hidrofóbicas na superfície de partículas de polipropileno (com diâmetros da ordem de 3,7 mm) hidrofobizadas previamente com um tratamento com ácido oléico. As partículas minerais aderidas são posteriormente separadas do sistema por flotação (flutuação), aproveitando a baixa densidade das partículas transportadoras plásticas (0,68 g/cm³). Após, as partículas minerais são extraídas das partículas de polipropileno por um tratamento com agitação usando uma solução alcalina de NaOH (pH 12).

Ateşok *et al.* (2001) utilizaram carvão com baixo teor de cinzas como partícula transportadora para flotação de carvão com maior teor de cinzas e de difícil flotabilidade. O melhor tamanho de partícula transportadora foi entre 0,1 e 0,3 mm para partículas de 0,02 mm que foram carregadas.

Tabosa (2007) utilizou as partículas com maior flotabilidade da polpa (primeiras a serem flotadas) como as transportadoras no beneficiamento de minério de cobre, chamando flotação com reciclo de concentrado (FRC), onde com a recirculação do concentrado no primeiro minuto causou um incremento de 17% na recuperação metalúrgica quando comparado com ensaios sem a recirculação, além de observar um aumento na cinética de flotação.

Os principais parâmetros que definem esse processo são a hidrofobicidade e granulometria das partículas, a hidrodinâmica do sistema e a relação de massas entre as partículas minerais e as transportadoras. Separações eficientes foram alcançadas para os diferentes sistemas estudados (bornita, calcopirita, hematita, ouro, calcita, fosfatos e fluorita).

Uma das técnicas desenvolvidas para o preparo do “*carrier*” (transportador) consiste no condicionamento prévio desse com reagentes, com melhor dispersão de reagentes na polpa, adsorção seletiva e preferencial orientada para minerais de valor. Como consequência, o consumo de reagentes é reduzido.

Fuerstenau *et al.* (1991) concluíram, em estudo de flotação autotransportadora de hematita, que a adição ao sistema de partículas grossas deste mineral, em uma proporção de 40% em peso, hidrofobizadas em um pré-condicionamento com dodecil sulfato de sódio, aumenta tanto a recuperação como a seletividade do processo de flotação autotransportadora de finos deste mineral.

Subrahmanyam e Forssberg (1990), em estudos de flotação autotransportadora de galena, utilizaram partículas grossas (20 a 38 micrometros) para intensificar a recuperação da fração menor que 5 micrometros. Porém, quando usaram partículas grossas no intervalo de 53 a 38 micrometros, a turbidez da solução (utilizada para avaliar a remoção de finos em suspensão) aumentou e diminuiu com o tempo, ou seja, em prolongados períodos de agitação ocorre a formação e a ruptura dos agregados. Tais flutuações na turbidez da solução são explicadas pela variação na proporção de finos para grossos.

Os processos como a floculação seletiva com polímeros, a flotação por cisalhamento (*shear flocculation*), a flotação transportadora e autotransportadora são todos exemplos do mesmo efeito de agregação das partículas. A hidrofobização e a agregação sob uma intensa agitação são os principais parâmetros envolvidos nestes processos (exceto para a floculação seletiva), que se diferenciam posteriormente na forma de separação dos agregados formados.

2.3.3. Condicionamento em Alta Intensidade (CAI)

O conceito de floculação cisalhante foi estendido ao estágio de condicionamento antes da flotação, onde a agregação das partículas hidrofóbicas ocorre através de condições hidrodinâmicas favoráveis, denominado condicionamento em alta intensidade (CAI).

Os condicionadores na flotação são tanques agitados onde são adicionados os reagentes. A intensidade de agitação está estreitamente associada com o tempo requerido para reações físicas e químicas ocorrerem (Laskowski, 2007).

Diversos autores estudaram o comportamento do CAI em diferentes sistemas minerais a Tabela 3 mostra os principais estudos de condicionamento em alta intensidade publicados.

Além de um ganho na recuperação, o CAI também apresenta outros benefícios, tais como aumento da cinética de flotação (Brum *et al.*, 1997, Valderrama e Rubio, 1998) e melhor dispersão de reagentes e da polpa (grossos) resultando em uma economia na dosagem.

O aumento de recuperação através do CAI é atribuído a diferentes mecanismos, tais como “limpeza” da superfície das partículas evitando fenômenos de *slimes coating*, aumento da difusão e distribuição de reagentes na polpa condicionada, *shear flocculation* (agregação hidrofóbica) das partículas e incorporação de microbolhas no condicionamento devido à cavitação causada pelas pás do impelidor.

Com o acréscimo de energia transferida para o condicionamento as colisões efetivas são otimizadas causando a agregação das partículas F-UF em partículas médias ou grossas. A agregação de partículas finas em partículas maiores de mesma composição mineralógica é chamada homoagregação e ocorrerá uma flotação autotransportadora (Figura 6). Se a agregação for de espécies minerais diferentes ocorrerá uma heteroagregação seguida por uma flotação transportadora (Figura 7).

Tabela 3. Principais estudos de flotação com condicionamento em alta intensidade (CAI)

Autor	País/Sistema mineral	Descrição
Rubio e Brum (1994)	Brasil/Chile / Cu/Mo	Influência do estágio do CAI na recuperação de sulfetos de cobre e molibdênio em escalas de laboratório e piloto. Ganhos > 2% na recuperação de finos de ambos os sulfetos. As energias transferidas à polpa foram da ordem de 0,1 a 4 kWh·m ⁻³ e os principais parâmetros envolvidos foram a turbulência e a concentração de coletor.
Davis e Hood (1994)	EUA / Fosfato	Estudo do CAI na flotação rougher de grossos de fosfato com 4 tipos de condicionadores e o tempo de condicionamento. A recuperação metalúrgica aumenta com o CAI e o quartzo, inicialmente ativado pelos reagentes, perde a ativação com a ação da agitação.
Valderrama e Rubio (1998); Valderrama <i>et al.</i> , (1997)	Chile / Ouro	O efeito do CAI na pré-flotação de Au foi estudado em escala de laboratório, mantendo-se o grau de turbulência constante e variando a energia transferida à polpa. Com CAI ocorreu aumentos de 24% na recuperação de Au, 50% no teor e 3 a 4 vezes maior a constante cinética. Partículas finas aderem-se melhor à superfície das grossas (Au e FeS ₂) a baixos valores de energia transmitida à polpa, 0,5 a 2 kWh·m ⁻³ , e a 4 kWh·m ⁻³ os finos agregam-se entre si, porém para > 4 kWh·m ⁻³ a ação de forças cisalhantes diminui o efeito.
Engel <i>et al.</i> , (1997)	Austrália / Ni	O <i>design</i> do impelidor e a reologia da polpa, no CAI, foram investigados com o objetivo de criar procedimentos para o “scale-up”. Para maiores taxas de cisalhamento e potência por unidade de volume, maiores cinéticas de flotação e melhores valores de teor e recuperação.
Rosa <i>et al.</i> (1998)	Brasil / Sulfeto de zinco	CAI como etapa pré-flotação de finos e ultrafinos de sulfeto de zinco, em escala de laboratório. Foram obtidos aumentos de 14% nos %R de ZnS e pelo menos 2,8 na cinética de flotação, com um aumento de 31% de recuperação real (<i>true flotation</i>) e uma diminuição no grau de arraste de ganga.
Chen <i>et al.</i> , (1999a,b)	Austrália / Pentlandita (Ni)	O CAI melhora a flotação tanto de minério de Ni com finos quanto sem fração de finos. Ainda houve um aumento significativo na constante cinética de flotação de pentlandita para as frações intermediária e grossas. A flotação da fração sem finos teve um aumento da constante cinética para todas as frações, exceto para a fração menor que 7 µm. A limpeza da superfície das partículas de pentlandita seria o principal efeito.
Bulatovic e Wyslouzil (1999)	Canadá / Sulfeto de chumbo e zinco	CAI na etapa de flotação rougher de sulfeto de Zn, em 1986. Cada tanque de condicionamento (120 m ³) foi equipado com um motor de 170 HP e um mecanismo de condicionamento em alta intensidade. Em 1995, condicionadores de alta intensidade foram adicionados à alimentação da etapa cleaner. Foram obtidos melhores resultados metalúrgicos e cinéticos
Aldrich e Feng (2000)	África do Sul / Minérios sulfetado	Comparação entre condicionamento em vasos agitados, ultrassom e uso de “prato vibrador”. CAI em vasos agitados foi especialmente benéfico para a flotação de partículas finas de sulfetos, enquanto que a agitação por ultrassom mostrou ser mais efetiva para a remoção de camadas oxidadas das partículas. Já o “prato vibrador” atuou na formação de bolhas, resultando em maiores taxas de colisão bolha-partícula.
Negeri <i>et al.</i> (2006)	Canadá / Sulfeto de Zinco	CAI na flotação seletiva de cobre de um sistema mineral Cu/Pb/Zn, em escala de laboratório e industrial. Avaliação do efeito da intensidade do cisalhamento e duração do CAI na recuperação de esfalerita. Análise superficial mineral indicou que o tratamento com alto cisalhamento da polpa resulta em uma maior limpeza e maior ativação da superfície da esfalerita, resultando em melhores recuperações.
Wei <i>et al.</i> , (2006)	China / Cu/Pb/Zn/Fe	A agregação entre bolhas e partículas no CAI foi estudada constando que o CAI permite a formação de pequenas bolhas devido à cavitação hidrodinâmica, aumentando a probabilidade de colisão bolha-partícula. No CAI muitas bolhas pequenas são produzidas <i>in situ</i> , na superfície de partículas finas e a maioria das partículas são agregadas sob ação de interação entre essas bolhas produzidas na superfície das partículas.

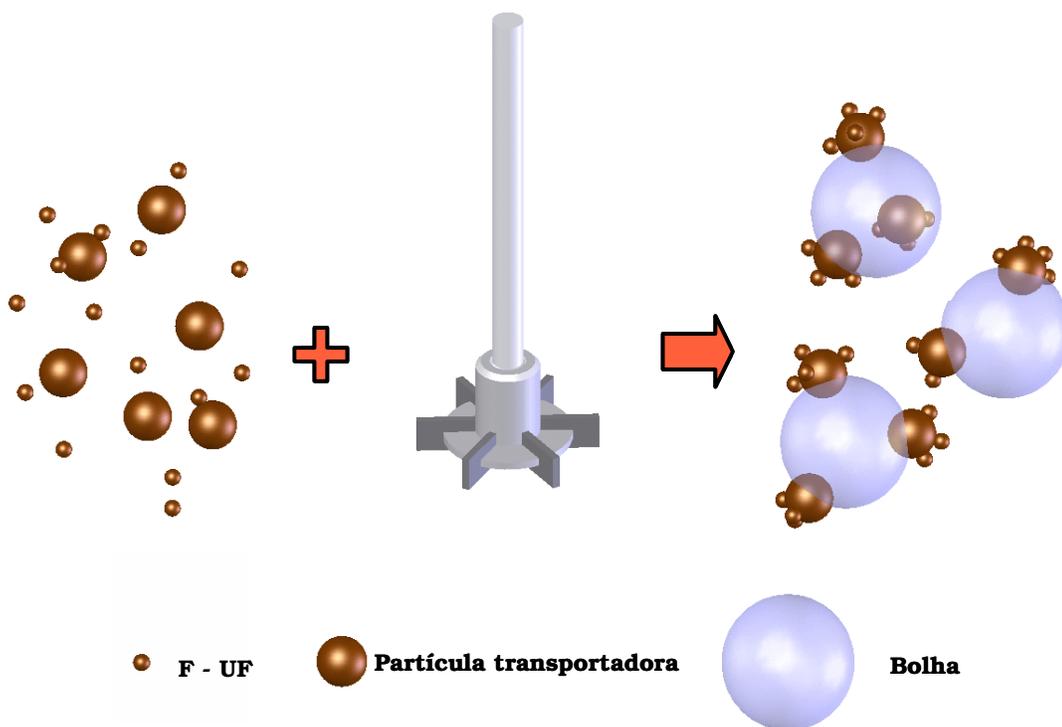


Figura 6. Adesão por homoagregação e flotação autotransportadora.

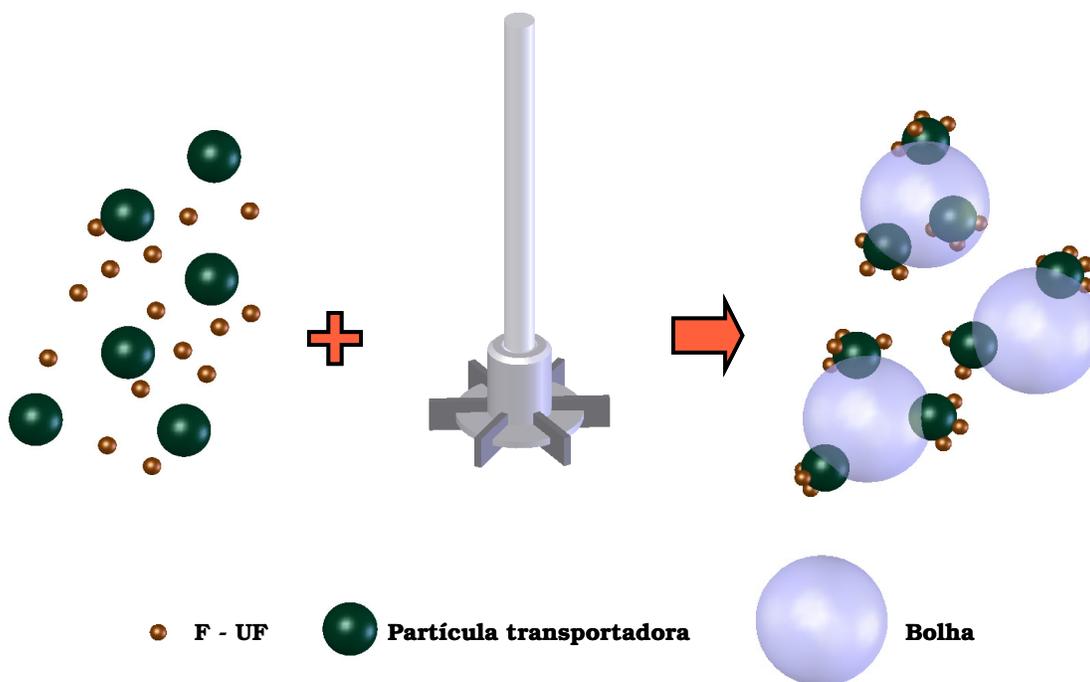


Figura 7. Adesão por heteroagregação e flotação transportadora.

Rosa *et al.*, (1998) em estudo da adição de uma etapa de condicionamento turbulento com sulfeto de zinco propõem que, dependendo da quantidade de energia transferida pelo CAI à polpa, ocorre a formação de agregados hidrofóbicos entre partículas com diferentes granulometrias, entre finas e médias, e finas e finas, que justifica a existência do aumento de recuperação em dois picos. Esse fenômeno também é observado no trabalho de Valderrama e Rubio (1998) com minério de ouro, onde o aumento de recuperação ocorre em dois pontos distintos, com diferentes energias transferidas à polpa (expresso em $\text{kWh}\cdot\text{m}^{-3}$ de polpa), conforme mostrado na Figura 8.

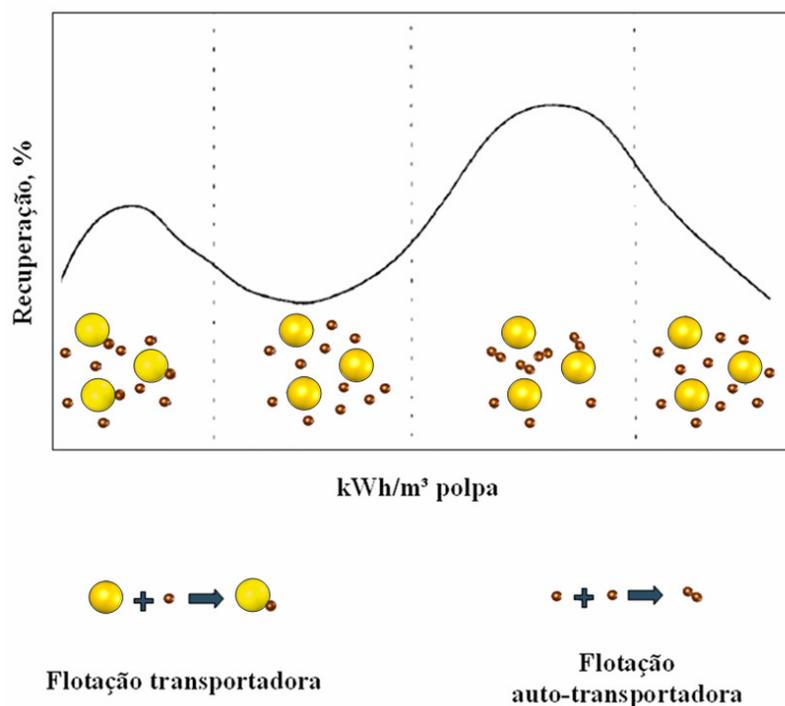


Figura 8. Fenômeno de agregação de partículas durante estágio de condicionamento e mecanismos da flotação (Valderrama e Rubio, 1998).

Wei *et al.* (2006) propõem que o mecanismo que ocasiona o aumento da recuperação da flotação com CAI seja a incorporação à polpa de bolhas geradas pela cavitação provocada pela alta velocidade periférica presente nas pás do impelidor, resultando em uma floculação hidrofóbia gerada por uma ponte de bolhas (Figura 9), aumentando assim a probabilidade de colisão na célula de flotação. A nucleação da bolha na superfície da partícula elimina a necessidade do estágio de colisão para coleta da partícula (Zhou *et al.*, 1994), fazendo com que aumente a recuperação.

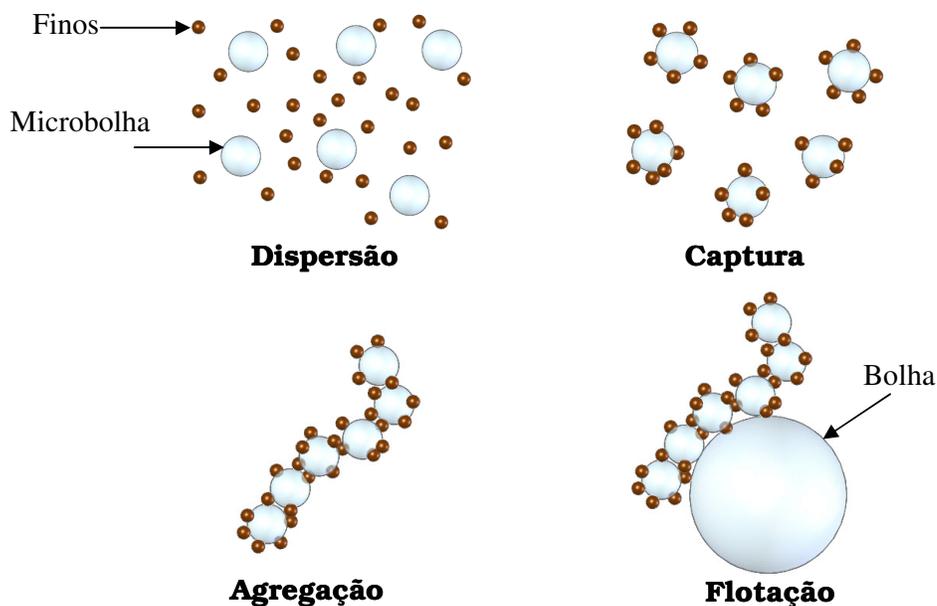


Figura 9. Mecanismo CAI sugerido por Wei *et al.* (2006).

Para que ocorra a agregação existe a influência de diversos fatores. Koh e Warren (1979) citam Jarrett e Warren (1977) que listam esses fatores como sendo: o tamanho das partículas, sua carga superficial, sua hidrofobicidade, o tempo que as partículas em suspensão são agitadas, a velocidade de agitação e a proporção de minerais de valor na polpa. Outra variável importante é a geometria do sistema (impelidor e tanque) estudada por diversos autores (Engel *et al.*, 1997; Rosa, 1997; Valderrama *et al.*, 2001; Negeri *et al.* 2006).

Rosa (1997) desenvolveu um modelo conceitual do processo CAI em termos de “probabilidade de agregação” (P_{ag}), descrito como:

$$P_{ag} = P_c \cdot P_a \cdot P_s \quad [\text{Eq. 3}]$$

onde:

P_c é a probabilidade de colisão entre as partículas;

P_a é a probabilidade de adesão entre as partículas e formação do agregado;

P_s é a probabilidade do agregado formado permanecer estável.

Segundo Rosa (1997), cada uma dessas probabilidades depende de vários fatores como o tamanho e distribuição de tamanho de partículas, grau de hidrofobicidade, turbulência do

sistema, entre outros. Esses fatores possuem um “grau de influência” variável sobre cada probabilidade, sendo que a quantificação desta influência é muito complexa e específica para cada sistema estudado. No entanto é possível se chegar a um consenso em relação aos fatores envolvidos em cada probabilidade.

Diversos autores (Trahar, 1981; Lu e Dai, 1988; 1990; Jordan e Spears, 1990; Spears e Stanley, 1994), embora divergindo com relação ao grau de influência de cada fator, afirmam que a probabilidade de colisão entre as partículas dependerá, em ordem decrescente de importância, do tamanho, da concentração e da velocidade relativa das partículas, que é uma função da energia transferida ao sistema.

A probabilidade de adesão para Trahar (1981) é diretamente proporcional ao grau de hidrofobicidade e inversamente proporcional ao tamanho de partículas. Trahar afirma que quando o grau de hidrofobicidade for elevado, a probabilidade de adesão atinge um valor máximo independente do tamanho das partículas. Outros autores (Jordan e Spears, 1990; Rubio e Hoberg, 1993; Spears e Stanley, 1994) postulam que além de um grau de hidrofobicidade adequado, é necessária uma energia de colisão mínima, para ocorrer a aproximação das partículas e permitir que as forças hidrofóbicas atuem, formando os agregados.

Já a probabilidade do agregado formado permanecer estável é inversamente proporcional ao tamanho do agregado e diretamente proporcional ao grau de hidrofobicidade das partículas (Trahar, 1981). O tamanho do agregado máximo possível de se formar e manter estável depende também principalmente do grau de turbulência do sistema (Tomi e Bagster, 1978; Jordan e Spears, 1990; Schulze, 1993; Spears e Stanley, 1994).

2.3.3.1 Geometria do CAI

A geometria do sistema, tanque e impelidor, tem forte influência no rendimento do CAI sobre a flotação. O reator deve operar em um regime turbulento alcançado devido a uma alta rotação transmitida ao eixo pelo motor.

Tanques e vasos cilíndricos verticais com fundo plano ou arredondado são, geralmente, os mais utilizados em sistemas mecânicos agitados. Outros tipos de recipientes também são utilizados para estes sistemas dependendo então de variáveis como espaço, processo, disponibilidade de tanques, etc., podendo ser do tipo cilíndrico horizontal,

quadrados ou retangulares. Em geral, tanques quadrados são mais adequados para sistemas agitados, pois produzem níveis de turbulência superiores aos tanques cilíndricos.

Usualmente, a relação entre a altura do líquido e do diâmetro do tanque fica entre valores compreendidos de 0,5 a 1,5 sendo esta razão denominada de razão de enchimento. Para um mesmo volume de líquido, um tanque baixo e largo necessita de impelidor de grandes dimensões girando em baixa rotação o que requer redutores de velocidade de alto torque. Um tanque alto e estreito poderá requerer múltiplos impelidores e eixos muito longos e normalmente apresenta problemas de rotação crítica e de mancais de escora-guia.

A adição de defletores também auxilia no desempenho. O uso adequado assegura boa agitação ao longo de todo vaso, enquanto o uso excessivo reduz o fluxo de massa e localiza a mistura, resultando em um rendimento baixo (Oldshue, 1983). É recomendado utilizar defletores com até 1/10 do diâmetro do tanque. Rosa (1997) estudou o condicionamento turbulento na flotação de minério sulfetado de chumbo e zinco, onde aplicou o CAI com quatro, dois e sem defletores, obtendo um ganho na recuperação da flotação com o aumento do número de defletores utilizados.

Os impelidores utilizados para sistemas com sólidos e líquidos são divididos basicamente em duas classes, axial e radial, dependendo do tipo de fluxo que irá provocar na polpa, conforme mostrado nas Figuras 10 e 11.

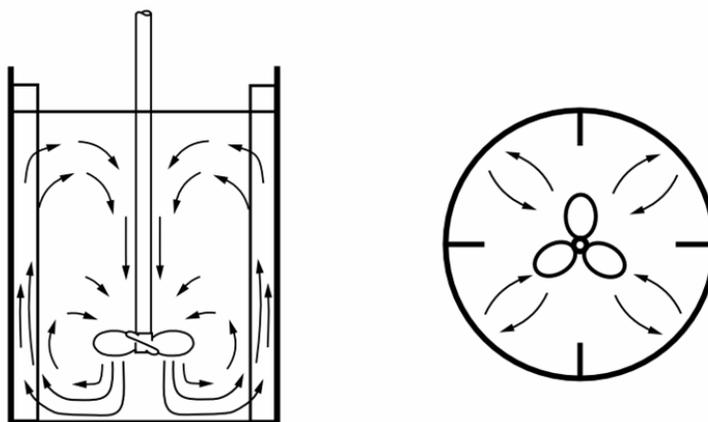


Figura 10. Fluxo provocado por impelidor do tipo axial (adaptado de Perry e Green, 1997).

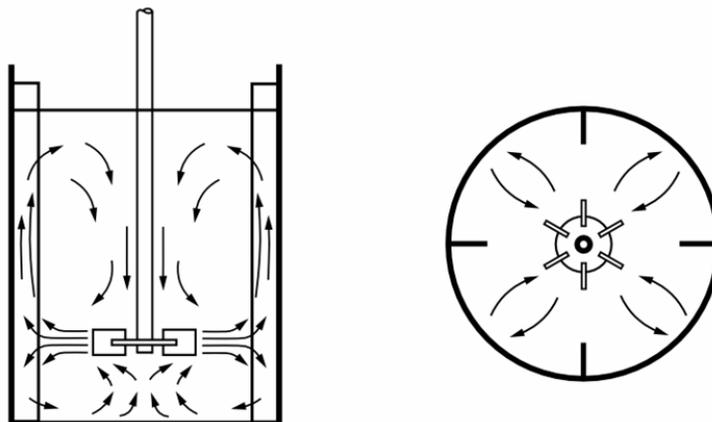


Figura 11. Fluxo provocado por impelidor do tipo radial (adaptado de Perry e Green, 1997).

Negeri *et al.*(2006) compararam o desempenho do CAI com um impelidor axial com um radial na flotação de um sistema Cu-Pb-Zn. Os experimentos mostraram um incremento nas recuperações de Cu e Pb com o impelidor radial, enquanto o Zn manteve a mesma recuperação para os dois sistemas. Valderrama *et al.*(2001) compararam os tipos de impelidores na flotação de um minério de Cu-Au, e obtiveram uma melhor recuperação metalúrgica na flotação quando utilizaram os impelidores do tipo axial no CAI.

Outras modificações na geometria do CAI foram sugeridas por Engel *et al.*(1997), que propõem, além da inclusão de defletores, o uso de um anel horizontal no mesmo nível na polpa dentro do tanque que faria aumentar a eficiência da energia transmitida à polpa.

2.3.3.2. Cálculo da potência transmitida à polpa pelo condicionamento em alta intensidade (CAI)

Para quantificar a energia transferida à polpa em processos de condicionamento em alta intensidade é utilizada, a exemplo de diversos estudos (Valderrama e Rubio, 1997; Valderrama, 1997; Engel *et al.*, 1996; Rosa *et al.*, 1998; Chen *et al.*, 1999(a); Matiolo, 2006; Tabosa, 2007), a medida de “potência transmitida à polpa” expressa em $\text{kWh}\cdot\text{m}^{-3}$.

A potência desenvolvida, em um determinado momento, por um dispositivo de dois terminais em sistemas elétricos é dado pelo produto da diferença de potencial entre os terminais e a corrente que passa através do dispositivo. Conforme a equação,

$$P = I \cdot V \quad [\text{Eq. 4}]$$

onde I corresponde a corrente instantânea e V é o valor instantâneo da tensão. Se I é determinado em ampères e V em volts, a potência é dada em watts. Em um sistema de corrente contínua a potência será constante se a corrente e tensão se mantiverem constantes ao longo de um determinado período.

Potência Ativa

Em sistemas com corrente alternada senoidal a potência elétrica média desenvolvida por um dispositivo de dois terminais, é dado pelo produto dos valores quadrados médios ou eficazes da diferença de potencial entre os terminais e da corrente que passa através do dispositivo com o co-seno do seu ângulo de defasamento, conforme a equação

$$P = I_e \cdot V_e \cdot \cos\phi \quad [\text{Eq. 5}]$$

onde I_e corresponde ao valor eficaz da intensidade de corrente alternada senoidal, V_e é o valor eficaz da tensão senoidal e Φ é o ângulo de fase ou defasagem entre a tensão e a corrente. O termo $\cos \Phi$ é denominado fator de potência. A potência é dada em watts quando I_e está em ampères e V_e em volts. Este valor também é denominado potência ativa.

Potência Aparente

A potência aparente, ou teórica, é dada quando não se inclui o termo $\cos \Phi$ que representa a defasagem que existe entre a corrente e a tensão, obtém-se o valor que se denomina potência aparente ou teórica S que se expressa em volt ampères (VA):

$$S = I_e \cdot V_e \quad [\text{Eq. 6}]$$

2.3.3.3. Scale-up de tanques agitados

As técnicas de *scale-up* de tanques agitados baseiam-se em fórmulas empíricas e devem ser feitas com números reais, particulares de cada caso. Para isso é necessário que as etapas de laboratório, piloto e industrial sejam feitas em sistemas similares, mantendo a proporcionalidade de dimensões do tanque e do impelidor.

Os critérios de escalonamento mais comumente usados são baseados na potência aplicada por unidade de volume ou no torque por unidade de volume constantes.

A potência absorvida em um sistema fluido agitado está diretamente ligada ao número de Potência, N_P , que pode ser definido como a relação entre as forças de arraste e as forças de inércia presentes no sistema. Em sistemas com regime turbulento, número de Reynolds maior que 2000, o número de potência é constante para cada tipo de hélice impulsora e seu valor pode ser obtido experimentalmente relacionando N_{REY} e N_P , podendo ser encontrado na literatura.

Para verificar o N_{REY} (número de Reynolds), Perry e Green (1997) sugerem uma equação para fluidos em vasos agitados como sendo:

$$N_{REY} = D^2 N \rho / \mu \quad [\text{Eq. 7}]$$

Onde: D - Diâmetro do impelidor em pés,

N - Velocidade do impelidor em rps,

ρ - Densidade da polpa em lb/ft³

μ - Viscosidade em lb/ft s

Resultando em um N_{REY} maior que 2000 o sistema opera em regime turbulento com isso o valor de número de potência, N_P será constante e característico para cada impelidor.

Com o número de potência é possível encontrar a potência, P em watt, empregada por um motor para agitar uma polpa pela seguinte equação (Oldshue, 1983), já utilizada em condicionamento em alta intensidade por Valderrama (1997):

$$P = N_P \rho N^3 D^5 \quad [\text{Eq. 8}]$$

Onde: N_P - número de potência, adimensional

ρ - densidade da polpa, kg/m³

N - velocidade de rotação, rps

D - diâmetro do impelidor, m

Negeri, *et al.* (2006) estudaram o escalonamento de condicionamento em alta intensidade e relacionam as velocidades em escala de laboratório com industrial através da seguinte equação:

$$N_1 = (D_i / D_l)^{3/4} N_i \quad [\text{Eq. 9}]$$

Onde: N_1 - Velocidade de rotação em laboratório

N_i - Velocidade de rotação em industrial

D_i - Diâmetro do impelidor industrial

D_l - Diâmetro do impelidor de laboratório

Passando para sistemas piloto e industriais que têm vazões de alimentação maiores, são construídos tanques com as mesmas proporções dos utilizados em laboratório para manter o mesmo tempo de residência. Aplicando a equação [Eq. 9] se obtém a velocidade de rotação do impelidor neste novo sistema. Com a velocidade de rotação definida utiliza-se a [Eq. 8] para definir qual será a potência do motor escolhido para o reator.

3. EXPERIMENTAL

Materiais e Métodos

Foram realizados estudos de caracterização da amostra e de flotação com o condicionamento em alta intensidade. No estudo de flotação com condicionamento em alta intensidade foram realizados ensaios em uma coluna de laboratório com uma polegada de diâmetro e em colunas pilotos de quatro e vinte quatro polegadas para confirmação da técnica. Na Tabela 4 estão descritas as principais diferenças das três escalas do estudo de flotação.

Tabela 4. Características dos estudos de flotação com condicionamento em alta intensidade

Etapa	Laboratório 1"	Piloto 4"	Piloto 24"
Q alimentação, g/min	33,5	750	41 667
h coluna, m	2,2	7,0	10,0
Diâmetro interno, cm	2,54	10,16	60,96
Potência motor CAI, HP	0,11	0,33	10

Os testes foram realizados com amostras de polpa provenientes da usina de beneficiamento da Bunge Fertilizantes, localizada no município de Araxá, MG, Brasil. Na usina o minério passa pelas etapas de britagem, moagem em moinho de barras e passa por uma separação magnética de baixo campo onde é retirada a magnetita. O material não-magnético é classificado em hidrociclones, onde o *underflow* segue para uma moagem de bolas e o *overflow* para o circuito de flotação de finos naturais. Os finos naturais, denominados FN, são deslamados e adensados em microciclones, sendo o *underflow* enviado para o condicionador onde são adicionados depressor (fubá de milho gelatinizado) e soda para ajuste de pH. A polpa foi amostrada através de um *by-pass* na tubulação da polpa que alimenta esse condicionador (Figura 12).

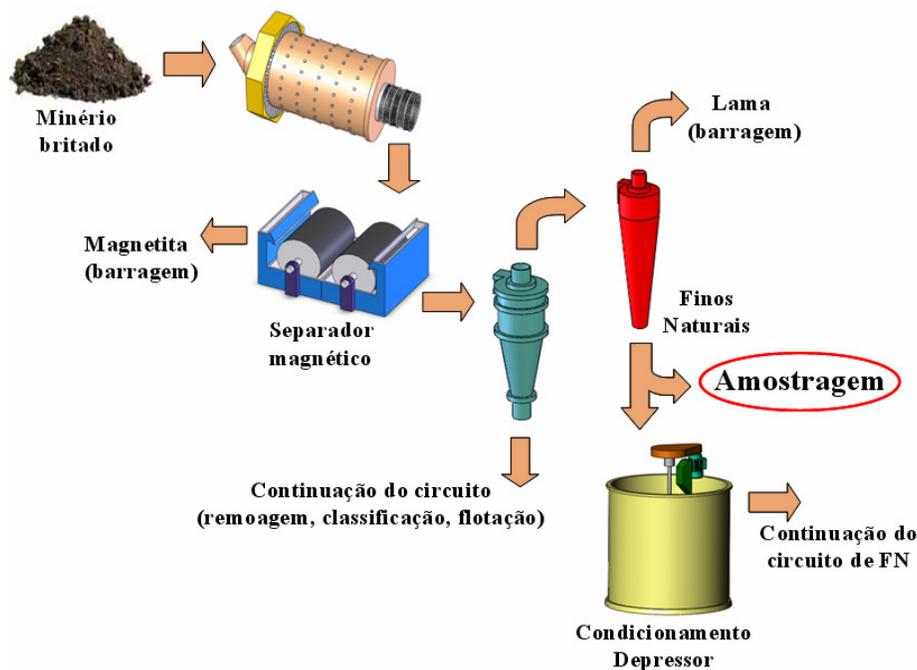


Figura 12. Ponto de amostragem dos Finos Naturais na usina de beneficiamento da Bunge Fertilizantes S.A. Unidade Araxá.

A recuperação de apatita foi calculada com base nas análises de CaO conforme o procedimento adotado pela Bunge Fertilizantes. Esse procedimento foi utilizado devido à apatita ser o único mineral portador de Ca do sistema, e existir fosfatos secundários.

3.1 Caracterização da amostra

Para o estudo de caracterização da amostra e ensaios de flotação em laboratório, foram utilizadas aproximadamente 200 kg de polpa, do circuito de Finos Naturais.

Na preparação e caracterização da amostra, as atividades realizadas incluíram:

- i. Desaguamento e secagem das amostras;
- ii. Desagregação, homogeneização e quarteamento;
- iii. Amostragem de material para caracterização;
- iv. Micropeneiramento a úmido em micropeneiras (Retchz);

- v. Análise química das frações separadas via micropeneiramento;
- vi. Armazenamento do restante da amostra para os estudos de flotação.

A amostra de polpa do minério foi desaguada, para retirada do excesso de água, e então secada em estufa a 70 °C até verificar a ausência de umidade, exceto a intrínseca. Após seca, a amostra foi desagregada, homogeneizada e quarteada. Foram retiradas alíquotas para análise granulométrica, química e mineralógica.

3.1.1 Análise Granulométrica, Química e Granuloquímica

Com o material menor que 44 μm (325 *mesh tyler*) foram realizadas as separações nas faixas de 30 μm , 15 μm e 5 μm para os FN, sendo o material retido separado e armazenado e enviado à Bunge para as análises químicas. A quantidade aproximada de 3g foi acumulada através de várias bateladas, usando o sistema de Micropeneiramento por Ultra-Som - tipo US 1 Marca Retsch.

O procedimento adotado foi a homogeneização do material <44 μm proveniente do peneiramento convencional, após a amostra foi pesada (~1g) em balança analítica e colocada em Becker de 100ml. A mesma foi dispersa numa solução de 80 mL de água, álcool comercial (3:1) e pirofosfato de sódio ($\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) na concentração de 0,6 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$. Esta suspensão foi tratada durante 1 minuto em banho de ultra-som. A pilha de micropeneiras com as malhas foi montada no banho de ultra-som. Este sistema recebe a suspensão pela peneira de 30 μm dando início ao peneiramento. Após a passagem da amostra pela peneira de 30 μm são realizadas diversas lavagens do material retido. A peneira era retirada, repetindo a mesmo procedimento nas peneiras 20 e 5 μm .

Os sólidos retidos nas micropeneiras foram filtrados num filtro de membrana com abertura de poros de 1,2 μm e secados a 60 °C em estufa. Após a secagem foram colocados num dessecador para esfriamento, retirada da possível umidade e pesados em balança analítica. As amostras foram então enviadas à Bunge para a análise química.

3.2. Estudos de flotação em escala de laboratório

3.2.1. Ensaio *Standard*

Os ensaios foram realizados em uma coluna convencional reta de laboratório, fabricada em vidro, com diâmetro interno de 2,5 cm, 2,20 m de altura e volume efetivo de 1,5 L, composto por cinco módulos. A polpa (10 litros) com 20% de sólidos em peso foi condicionada por 10 minutos com o depressor (fubá de milho gelatinizado) e com soda para ajuste de pH, mantendo em 12, após, foi condicionada por mais 10 minutos com o coletor (óleo de soja saponificado) em um tanque com capacidade de 15 litros dotado de um motor com hélice para manter a polpa sob agitação.

Após os vinte minutos de condicionamento com os reagentes a polpa foi alimentada à coluna a 1/3 do topo com o auxílio de uma bomba peristáltica. O rejeito foi retirado pela parte inferior da coluna através de uma bomba peristáltica e o concentrado foi coletado em um recipiente de fundo inclinado situado no topo da coluna. O ar foi injetado na base da coluna, com controle de vazão feito por um rotâmetro, através de um tubo poroso.

A velocidade superficial do fluxo da alimentação, J_a , foi fixada em $0,49 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ e do gás (J_g) também em $0,49 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$. A altura da espuma foi fixada em 35 cm e controlada pela variação do fluxo da corrente do rejeito. Os fluxos de alimentação e rejeito foram controlados de forma a se ter sempre um “bias” positivo. A Tabela 5 mostra a concentração de reagentes e pH de condicionamento (regulado com NaOH a 10%).

Tabela 5. Concentração de reagentes e pH de condicionamento para os FN

Minério	Óleo de soja (coletor) $\text{g}\cdot\text{t}^{-1}$	Fubá de milho (depressor) $\text{g}\cdot\text{t}^{-1}$	pH de condicionamento
Finos Naturais (FN)	60	1400	12

Os ensaios tiveram duração de 35 minutos, sendo vinte minutos para o sistema atingir o estágio estacionário e quinze minutos para a amostragem simultânea dos fluxos do concentrado e do rejeito. As amostras foram secadas em estufa por 24 horas a $70 \text{ }^\circ\text{C}$, homogeneizadas e retiradas alíquotas que foram enviadas para análise química na Bunge, Araxá. A Figura 13 mostra fluxograma esquemático do sistema utilizado e é apresentada na Figura 14 uma vista do sistema.

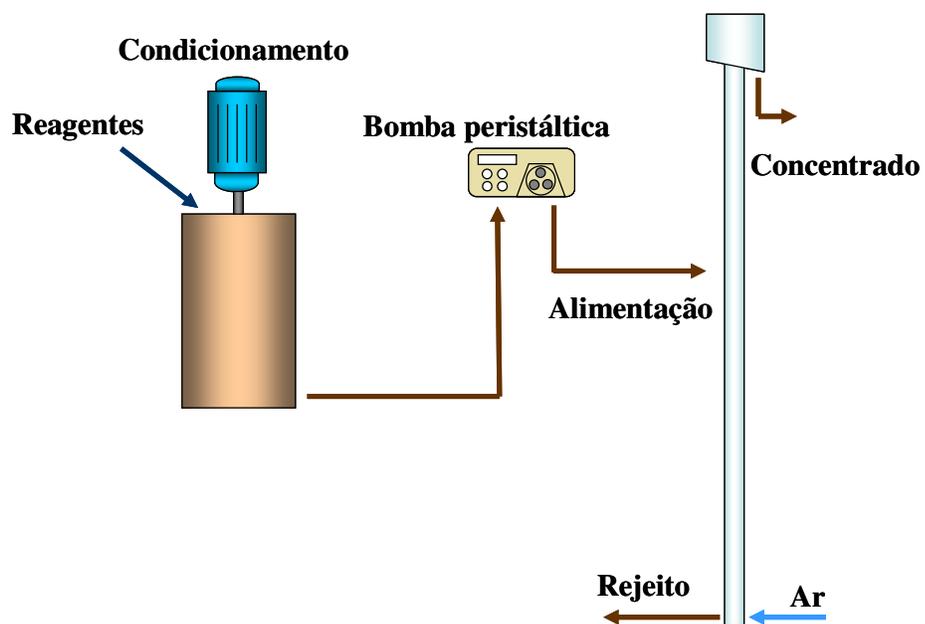


Figura 13. Sistema experimental para flotação em coluna de minério de fosfato em nível de laboratório.



Figura 14. Coluna de flotação utilizada nos estudos de flotação em laboratório.

3.2.2 Flotação com Condicionamento em Alta Intensidade (CAI)

Os estudos de flotação com CAI foram realizados seguindo o procedimento do ensaio *standard* onde, além da etapa de condicionamento convencional, foi adicionada uma etapa de condicionamento em um regime de alta turbulência. A polpa, após ser condicionada com os reagentes, foi bombeada para o tanque CAI. Após o condicionamento em alta intensidade a polpa foi bombeada para a coluna de flotação (Figura 15).

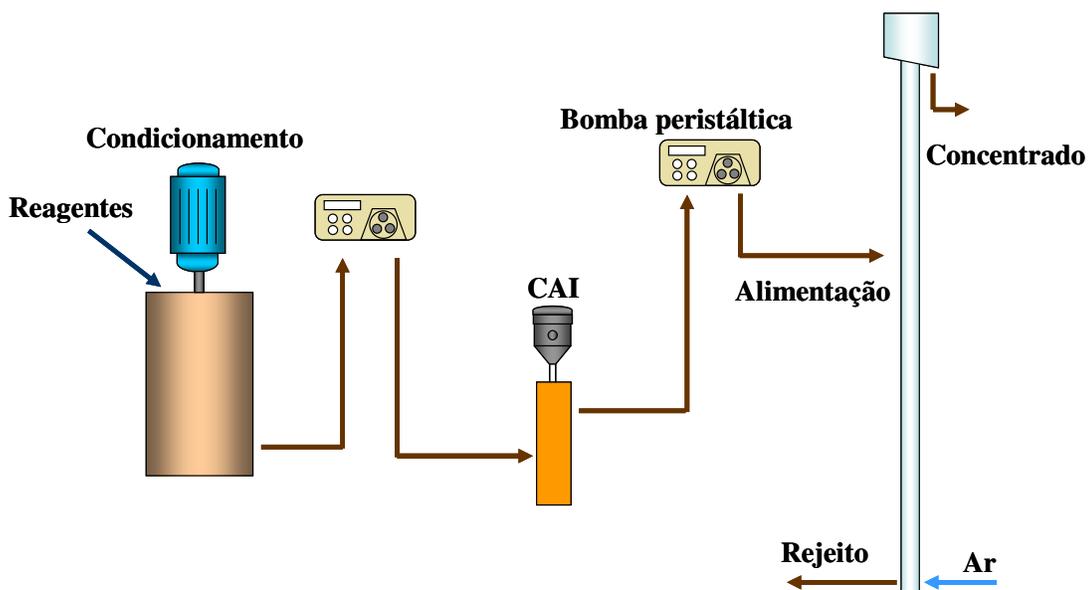


Figura 15. Sistema experimental para os estudos com CAI em nível de laboratório.

O reator CAI utilizado (Figura 16) foi uma célula de seção quadrada, com quatro defletores, dimensionados de tal forma que permitia um condicionamento em alta intensidade (elevada turbulência).

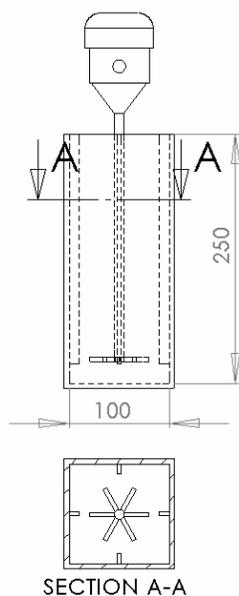


Figura 16. Tanque de condicionamento turbulento utilizado nos estudos de laboratório, dimensões em mm.

Nestes ensaios comparativos com o *Standard* foram avaliados cinco tempos de CAI, que correspondem a energias transferidas variando entre 1 e 4 $\text{kwh}\cdot\text{m}^{-3}$ de polpa, calculados segundo a equação [Eq. 10].

A Figura 17 mostra o sistema utilizado para o estudo de flotação em coluna com condicionamento em alta intensidade montado no laboratório.



Figura 17. Vista geral do esquema experimental para os estudos com CAI em laboratório.

A potência fornecida ao sistema foi medida com o auxílio de um amperímetro digital na entrada do variador de frequências que controla o motor e calculada conforme expressão a seguir:

$$P = V \cdot I \cdot \cos\varphi \cdot \eta \quad [\text{eq. 10}]$$

Onde:

P - potência , W;

V - tensão medida no sistema, V;

I - corrente medida no sistema, A;

φ - fator de potência ($\cos \varphi = 0,8$);

η - rendimento do motor (0,93).

2.2.3 Avaliação da Geometria do Impelidor do CAI

Os impelidores podem ser divididos dependendo se as correntes de fluxo induzidas são paralelas ou transversais à linha de centro do eixo. O primeiro tipo de impelidor é denominado “Impelidor de Fluxo Axial” e o segundo “Impelidor de Fluxo Radial”. Para este estudo foram utilizados dois impelidores com geometrias distintas, cada um com um tipo de fluxo.

Impelidor tipo Naval com 4 aletas

Consiste em um impelidor de fluxo predominantemente axial, desenhado com base na teoria de uma curva helicoidal. As pás destes impelidores são segmentos da superfície helicoidal gerada por uma curva helicóide, que possui passo constante e ângulo de inclinação variável, desde o cubo até a extremidade das pás.

Este tipo de impelidor é caracterizado pela relação passo/diâmetro, sendo o seu passo o avanço que qualquer ponto da superfície dá quando o impelidor gira uma volta. O passo da maioria dos impelidores aplicados na agitação situa-se entre 0,5 a 1,5 vez o diâmetro do mesmo. Em geral consomem menos potência que a maioria dos impelidores de mesmo diâmetro, girando à mesma rotação, entretanto, necessita de rotações maiores para transmitir a

mesma energia e capacidade de bombeamento à polpa. O impelidor de fluxo axial utilizado no estudo está representado na Figura 18.

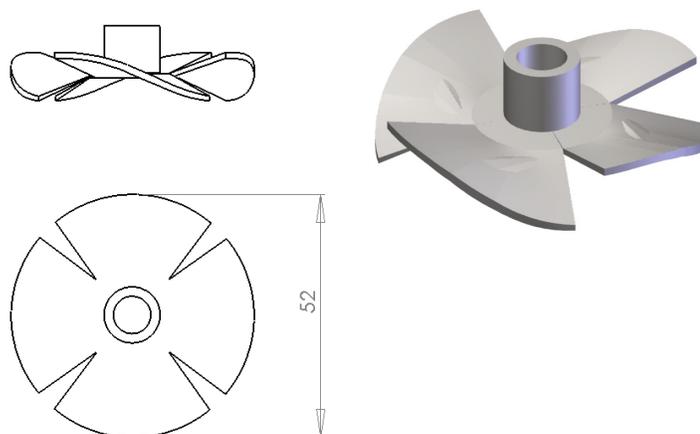


Figura 18. Impelidor de fluxo axial tipo naval com 4 aletas, utilizado no estudo (dimensões em mm).

Impelidor tipo Turbina Rushton de 6 aletas

Este tipo de impelidor possui um disco central com pás verticais montadas nas suas extremidades e gera um fluxo predominantemente radial que pode ser utilizado em sistemas que requerem elevados níveis de turbulência e cisalhamento. Construído normalmente com quatro ou seis aletas, tem sua principal aplicação na dispersão de gases em líquidos. Para o estudo foi utilizado um impelidor com diâmetro de 53 mm, representado na Figura 19.

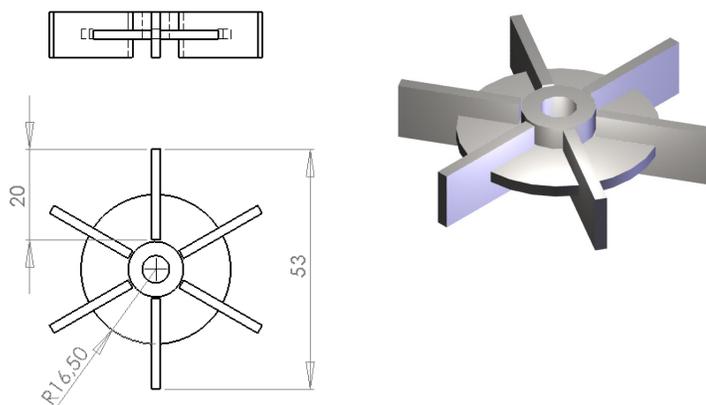


Figura 19. Impelidor de fluxo radial tipo turbina *rushton* com 6 aletas, utilizado no estudo (dimensões em mm).

2.2.4 Estudo da adição de partículas grossas como carregadoras no CAI

Com o objetivo de formar agregados com alta flotabilidade foi utilizado concentrado de apatita do circuito de grossos da Bunge, denominado GCA (Grossos do Concentrado Apatítico) amostrado no ponto de coleta de concentrado da coluna de flotação industrial da usina de beneficiamento (Figura 20).

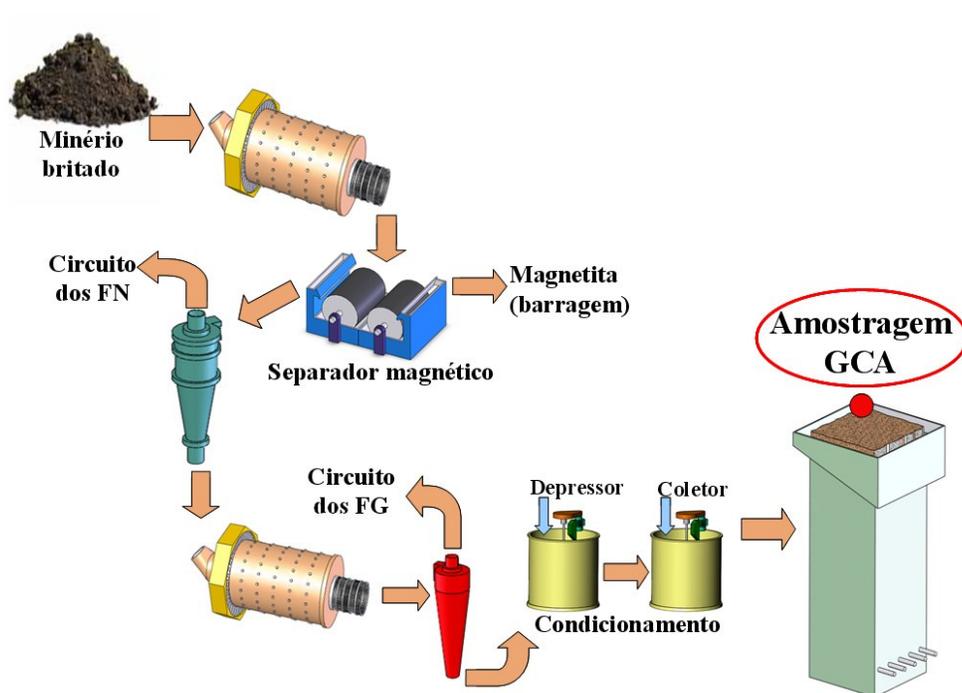


Figura 20. Ponto de amostragem do GCA na usina de beneficiamento da Bunge Fertilizantes S.A. Unidade Araxá.

A distribuição granulométrica das partículas grossas foi determinada através de peneiramento a seco auxiliado pelo peneirador Rotap, utilizando um conjunto de peneiras com aberturas de 200 μm , 150 μm , 105 μm , 74 μm , 53 μm , 44 μm , 37 μm e 25 μm . A distribuição granulométrica desta amostra está representada na Figura 21.

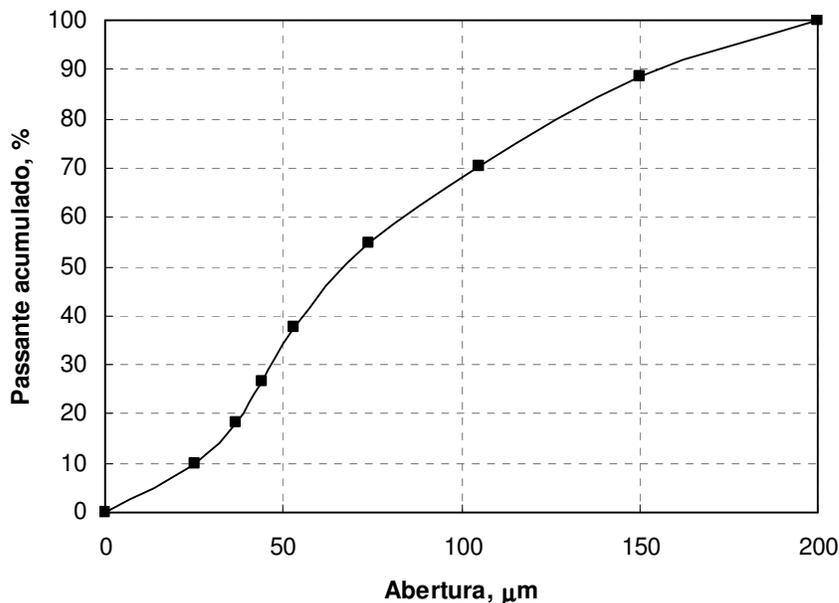


Figura 21. Distribuição granulométrica da amostra do concentrado do minério de fosfato (GCA) da Bunge Fertilizantes S.A. Unidade Araxá.

Os teores foram determinados por difração de raios-x, mostrados na Tabela 6.

Tabela 6. Teores (%) da amostra do concentrado do minério de fosfato (GCA) da Bunge Fertilizantes S.A. Unidade Araxá

P_2O_5	CaO	Fe_2O_3	SiO_2	Al_2O_3	MgO	BaSO_4	TiO_2	Nb_2O_3
33,75	46,99	7,36	1,51	0,42	0,39	2,62	2,43	0,29

3.3. Estudo de flotação em coluna piloto de 4''

3.3.1. Estudos de flotação em coluna convencional reta – ensaio *standard*

Foram realizados ensaios de flotação com os Finos Naturais-FN em coluna de flotação piloto com diâmetro de 4'' visando de determinar as variáveis operacionais (velocidade superficial da polpa, água de lavagem, ar) e concentração de reagentes, para obtenção de um ensaio padrão (*Standard* – STD) e produção (obtenção) de um concentrado com características metalúrgicas (teor e recuperação de P_2O_5 e conteúdo de impurezas) semelhantes ao produzido na usina de concentração.

Os ensaios foram realizados em uma coluna convencional piloto com diâmetro interno de 10,16 cm, 7,0 m de altura e volume efetivo de 48 L aproximadamente, composta por módulos em acrílico unidos por flanges.

A polpa foi amostrada através de um *by-pass* na tubulação que leva o *underflow* da ciclonagem (40-44% de sólidos em peso) até o tanque de condicionamento com o depressor e ajuste de pH. A partir deste ponto a polpa foi transportada por gravidade até a caixa de uma bomba no piso zero da usina, de onde foi bombeada até um tanque com capacidade de 3,2 m³ mantido sob agitação contínua. Desse tanque, a polpa foi transportada por gravidade até um tanque com capacidade de 400 L onde também é mantida sob agitação. A partir deste ponto a polpa foi transferida através de uma bomba peristáltica até o tanque CN-301 para condicionamento com o depressor fubá de milho e ajuste do pH, monitorado com um medidor de pH marca Metrohm, modelo E632, ambos dosados com bombas dosadoras peristálticas marca Masterflex. Desse tanque, a polpa escorre por gravidade até o tanque CN-302 onde ocorre o condicionamento com o coletor ácido graxo de soja, também dosado com bomba dosadora peristáltica marca Masterflex. Por gravidade, a polpa condicionada escorre até o tanque TQ-302 onde é feita a diluição da polpa para 25% de sólidos em peso com água industrial, com vazão controlada por um rotâmetro.

Após o condicionamento e ajuste da porcentagem de sólidos, a polpa foi alimentada a 1,26 m do topo da coluna através de uma bomba peristáltica. O rejeito foi retirado pela parte inferior da coluna com uma bomba peristáltica e o concentrado foi coletado em um recipiente de fundo inclinado situado no topo da coluna onde foi adicionada água para facilitar o escoamento até o recipiente de coleta da amostra próximo à base da coluna. A geração de bolhas foi feita através da passagem forçada de ar em um tubo poroso situado na base da coluna com pressão controlada por um regulador de pressão (1,5 kgf·cm⁻²) e vazão controlada por rotâmetro.

A Figura 22 mostra o fluxograma esquemático da unidade piloto de flotação em coluna de 4" montada para os estudos.

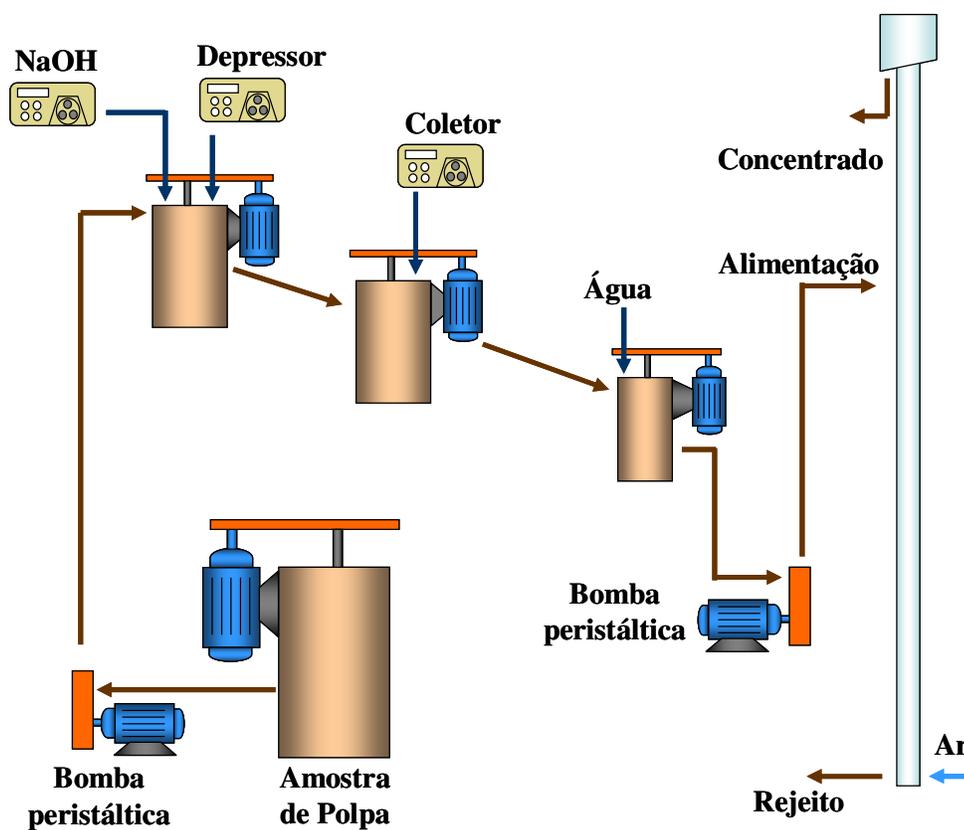


Figura 22. Sistema experimental montado para os ensaios de flotação *standard* (STD) do minério de fosfato da Bunge-Araxa em coluna de flotação piloto de 4".

CONDIÇÕES OPERACIONAIS DO ENSAIO STD

- Velocidade superficial do ar (J_{ar}) = $0,52 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$;
- Velocidade superficial da água de lavagem (J_L) = $0,37 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$;
- Velocidade superficial da polpa (J_p) = $0,65 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$;
- Massa de sólidos alimentada a coluna = $45 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$;
- [coletor ácido graxo de soja] = $40 \text{ g}\cdot\text{t}^{-1}$;
- [depressor fubá de milho] = $1600 \text{ g}\cdot\text{t}^{-1}$;
- altura da camada da espuma = $70\pm 1 \text{ cm}$;
- pH no condicionamento da polpa com o depressor e coletor = $12,0\pm 0,1$;
- regulador de pH = NaOH;

3.3.2 Estudos de flotação com condicionamento prévio em alta intensidade – CAI

Os estudos de flotação com CAI foram realizados seguindo o procedimento do ensaio STD, onde além da etapa de condicionamento convencional com o coletor, foi realizada uma etapa de condicionamento em um regime de alta turbulência obtido com a introdução de um reator CAI.

O reator de CAI utilizado foi um tanque cilíndrico adaptado com quatro defletores, dimensionados de tal forma que permita um condicionamento em alta intensidade. Nestes ensaios comparativos com o Standard, foi avaliado o efeito do grau de agitação no reator CAI, modificado através da variação da rotação do motor (controlada por um inversor de frequência) que agita a polpa no reator CAI. A Figura 23 mostra o fluxograma esquemático da unidade piloto operando com CAI.

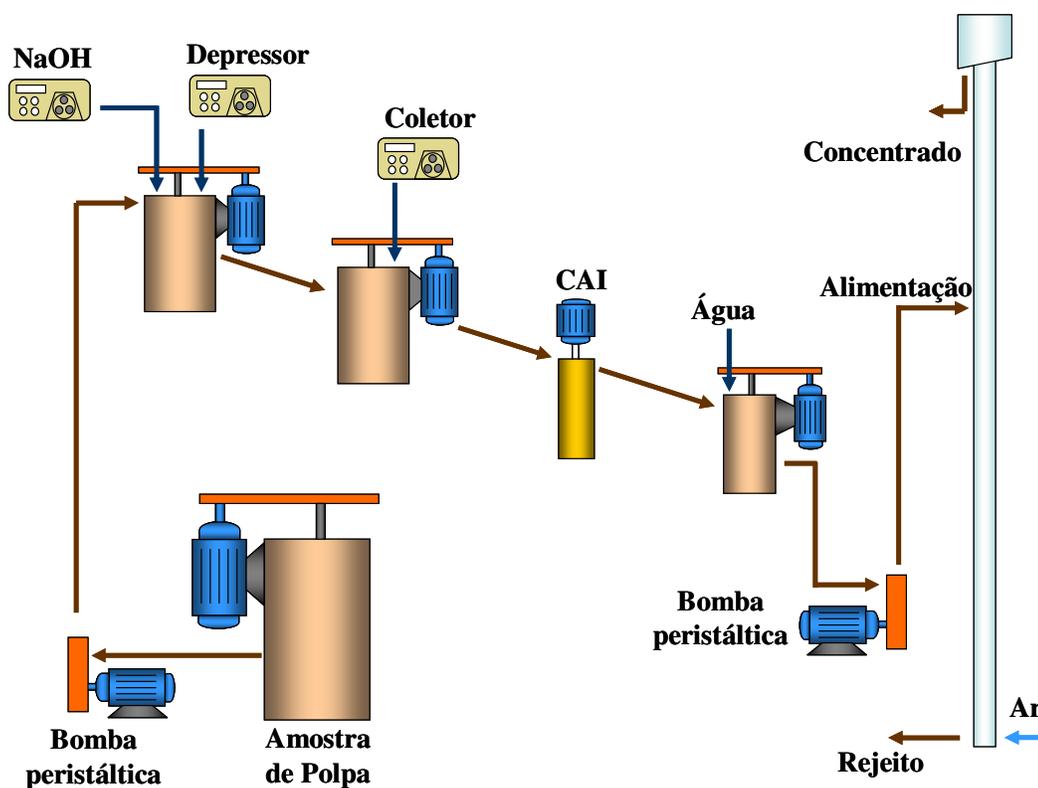


Figura 23. Sistema experimental montado para os estudos de flotação do minério de fosfato da Bunge-Araxá com pré-tratamento CAI em coluna piloto de 4”.

A Figura 24 mostra o detalhamento e dimensões do tanque utilizado nos estudos de flotação com condicionamento em alta intensidade em coluna de flotação piloto com diâmetro de 4". Na Figura 25 são mostradas vistas selecionadas deste tanque.

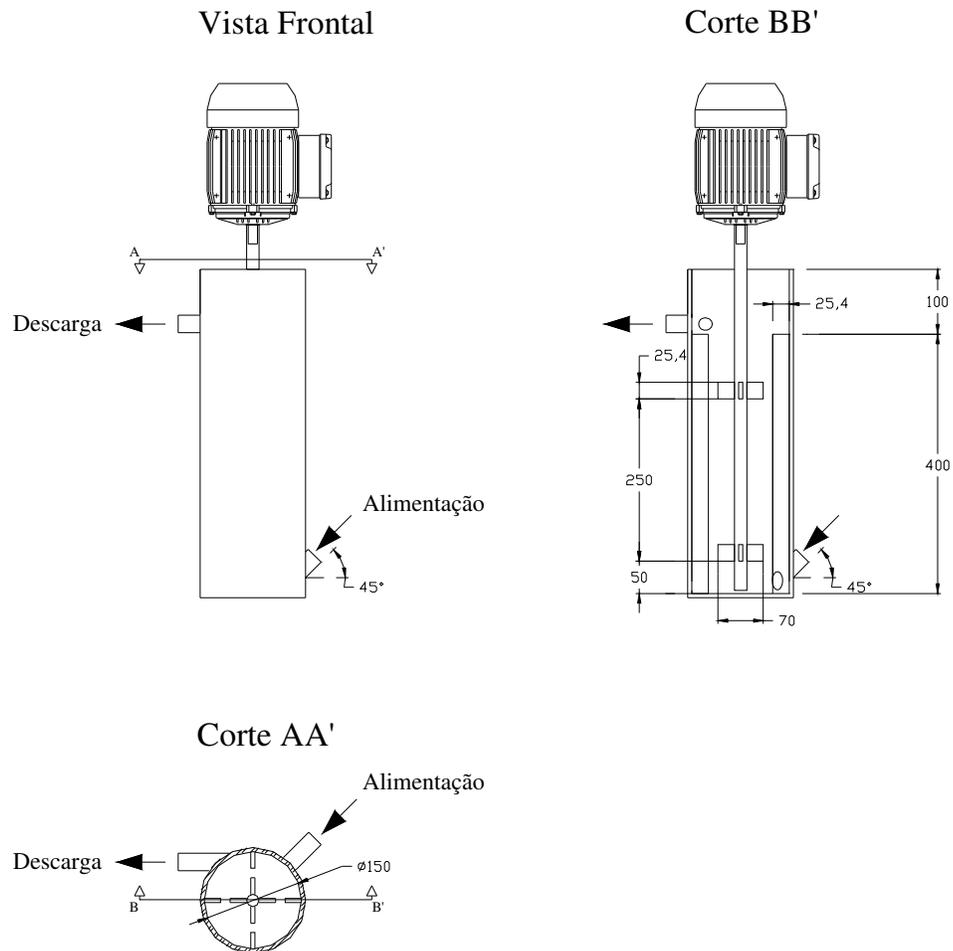


Figura 24. Tanque CAI utilizado estudo de flotação do minério de fosfato da Bunge-Araxá para coluna piloto de 4" (dimensões em mm).



Figura 25. Tanque de CAI utilizado no estudo de flotação piloto em coluna de 4” do minério de fosfato da Bunge-Araxá.

3.4. Estudos de flotação piloto em coluna de 24”

3.4.1. Ensaios *standard* (STD)

Para os estudos de flotação de Finos Naturais em coluna piloto com 24” foi utilizado o mesmo ponto de amostragem dos estudos em outras escalas. Primeiramente foram realizados ensaios padrão (*Standard*), que tiveram como objetivo determinar os parâmetros operacionais para que os ensaios tivessem características semelhantes aos praticados pela usina. Os ensaios foram realizados em uma coluna piloto com diâmetro interno de 61 cm e 10 m de altura útil.

A polpa foi amostrada através de um *by-pass* na tubulação que leva o *underflow* da ciclonagem (*under 9*) (40-44% de sólidos em peso) até o tanque de condicionamento com o depressor e ajuste de pH na usina de concentração. Logo, a polpa foi transportada por gravidade (mangueira de 2”) até a bomba vertical *BM 201*, marca *Denver®* no piso zero da Usina, de onde foi bombeada até o tanque *TQ 201* com capacidade de 3,2 m³ mantido sob agitação. Desse tanque, a polpa foi conduzida por gravidade até o tanque *CN-201* para condicionamento com o depressor fubá de milho (solução 3%_{p/v}), dosado com uma bomba peristáltica marca *Masterflex®* da *Cole Parmer*, modelo 7730065, cabeçote 7518-12, e ajuste do pH com NaOH (solução 15%_{p/v}). A soda foi dosada com uma bomba peristáltica marca *Masterflex®* da *Cole Parmer*, modelo 7553-71, cabeçote 7518-10 e o pH monitorado com um

medidor de pH marca *Micronal*®. Desse tanque, a polpa foi conduzida por gravidade até o tanque *CN-202* para condicionamento com o coletor ácido graxo de soja (solução a 2,5%_{p/v}), também dosado com bomba dosadora peristáltica marca *Masterflex*®, modelo 7523-27, cabeçote 7518-10. Por ação da gravidade a polpa condicionada foi conduzida até o tanque vertical *BM 202*, marca *Denver*®, que recalcou a polpa até o tanque *TQ 202* onde foi ajustada a porcentagem de sólidos da polpa (25%_{p/p}), realizada através da adição de água industrial com vazão controlada por um rotômetro com vazão até 10 m³h⁻¹ da marca *Applitech*.

Após o condicionamento e ajuste da porcentagem de sólidos, a polpa foi alimentada à 3,25 m do topo da coluna de flotação, por gravidade. O rejeito foi retirado pela parte inferior da coluna com o fluxo controlado por válvula do tipo solenóide. A geração de bolhas foi feita através da mistura ar/água em misturador do tipo MX, e passagem da mistura por dois *spargers* localizados na base da coluna. A água foi bombeada por uma bomba do tipo helicoidal da marca *Eberle* a uma pressão de 5 kgf·cm⁻². O ar foi injetado através do sistema da usina com pressão regulada em 7 kgf·cm⁻² através de um regulador de pressão, e com vazão ajustada através de um rotômetro da marca *Omel*. A Figura 26 mostra o fluxograma do estudo de flotação e na Figura 27 é apresentada uma foto do sistema.

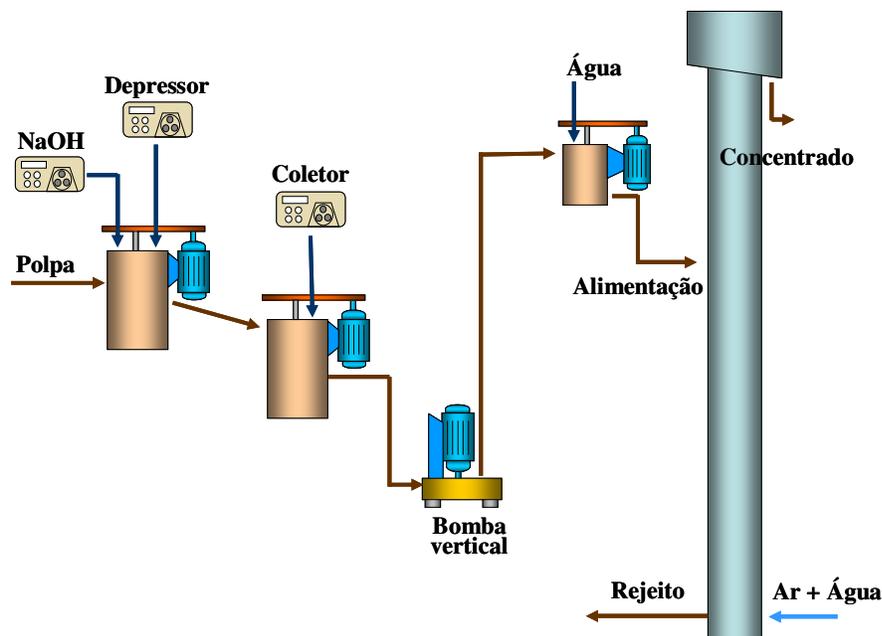


Figura 26. Sistema experimental montado para os ensaios de flotação *standard* (STD) do minério de fosfato da Bunge-Araxá em coluna de flotação piloto de 24”.



Figura 27. Vista parcial da unidade piloto de flotação em coluna de 24'' da Usina de Concentração de minério de fosfato da Bunge-Araxá.

Para amostragem foram retiradas amostras simultâneas da corrente do concentrado, rejeitos e alimentação, divididas em três alíquotas de 200 mL cada, formando uma amostra com volume de 600 mL de polpa. Cada amostra foi retirada depois de transcorrido um período de uma hora de operação com a coluna nas mesmas condições, sendo as três alíquotas retiradas em um intervalo de 10 minutos entre cada uma. Após a coleta, as amostras foram enviadas ao Laboratório de Desenvolvimento e Novas Tecnologias onde foram secadas em estufa a uma temperatura de 130°C por duas horas. Após a secagem, as amostras foram homogeneizadas e quarteadas em quarteador do tipo Jones e enviadas ao Laboratório Químico da Bunge onde foi feita a determinação dos teores através de fluorescência de Raios-X.

3.4.2. Estudos de flotação com condicionamento prévio em alta intensidade – CAI

Foram utilizados os mesmos procedimentos dos ensaios STD com a adição de uma etapa de condicionamento em um regime de alta turbulência. O reator de CAI utilizado foi um tanque cilíndrico construído com quatro defletores, dimensionados de tal forma que permitiu um condicionamento em alta intensidade (elevada turbulência). Nestes ensaios comparativos com o *Standard*, foi avaliado o efeito do grau de agitação no reator CAI, modificado através da variação da rotação do motor (controlada por um inversor de frequência) que agita a polpa no reator CAI. A Figura 28 mostra o fluxograma do estudo piloto em coluna de flotação de 24” com a adição da etapa de CAI.

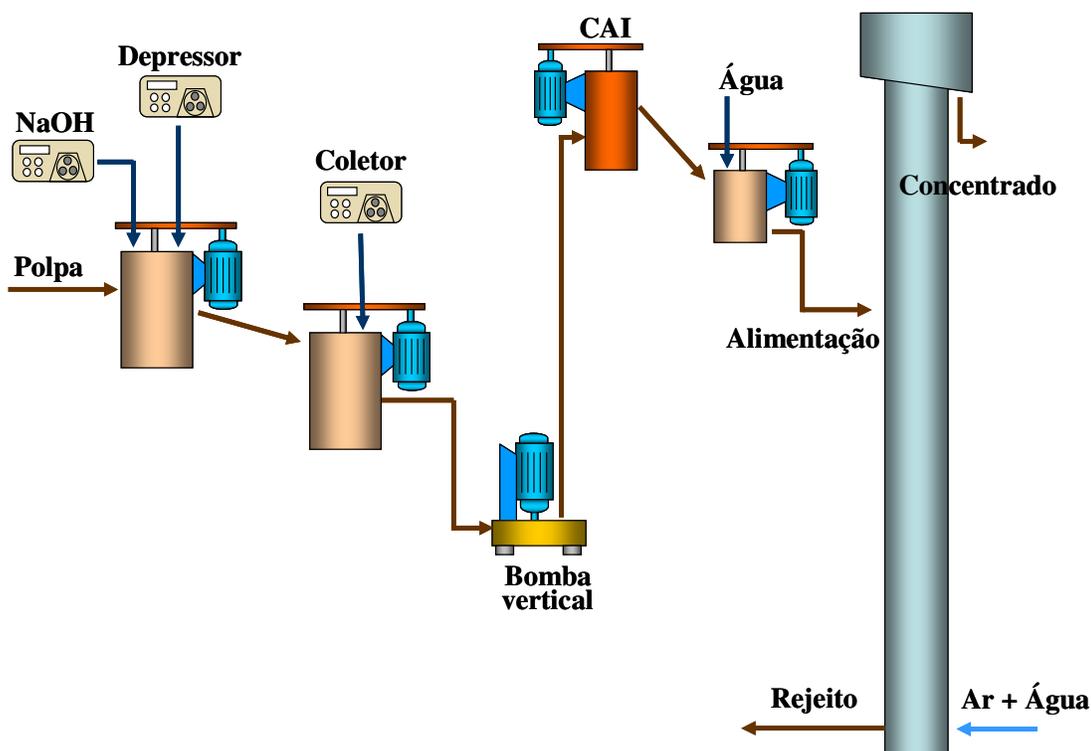


Figura 28. Sistema experimental montado para os estudo de flotação do minério de fosfato da Bunge-Araxá com pré-tratamento CAI em coluna piloto de 24”.

A Figura 29 mostra detalhes construtivos do reator CAI. A Figura 30 mostra vista do sistema de válvulas montado para desviar o fluxo vindo da etapa de condicionamento com coletor para o tanque CAI e após ser enviado para o tanque de diluição.

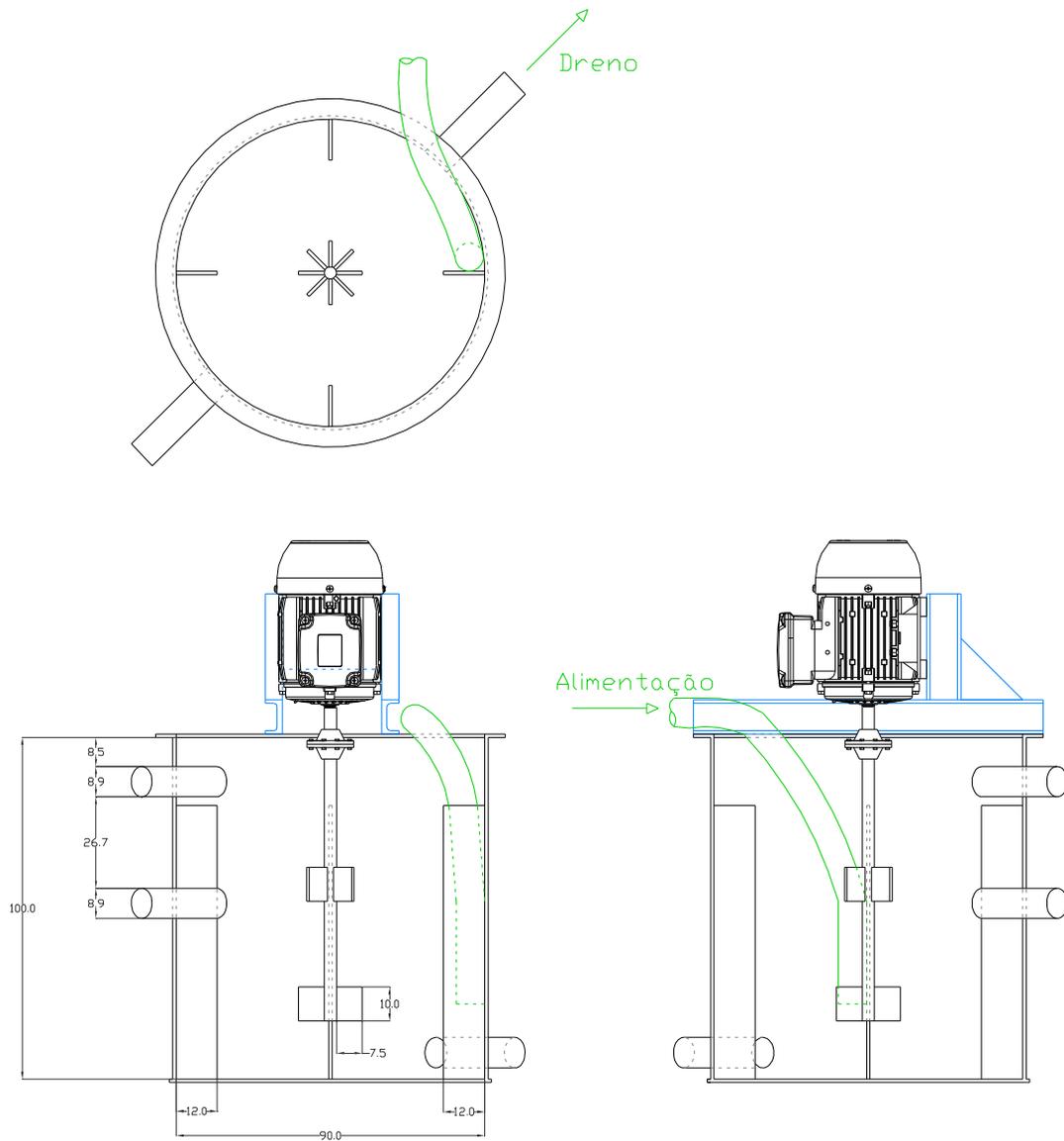


Figura 29. Detalhamento do tanque CAI para estudo de flotação em coluna de 24" (dimensões em mm).



Figura 30. Válvulas para introdução/retirada do tanque CAI no sistema de flotação.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Estudo de caracterização da amostra

A Tabela 7 mostra os valores dos teores médios da amostra de Finos Naturais e a Figura 31 mostra a distribuição granulométrica, medida em granulômetro a laser CILAS. A figura mostra que 67% das partículas encontram-se no intervalo <math> < 13\mu\text{m}</math>.

Tabela 7. Análise química de Finos Naturais para estudos CAI em nível de laboratório

P_2O_5	CaO	Fe_2O_3	SiO_2	Al_2O_3	MgO	BaSO_4	TiO_2	BaO	Nb_2O_3	CeO_2
11,5	11,4	29,6	16,5	4,5	3,0	1,5	5,2	2,5	0,4	3,8

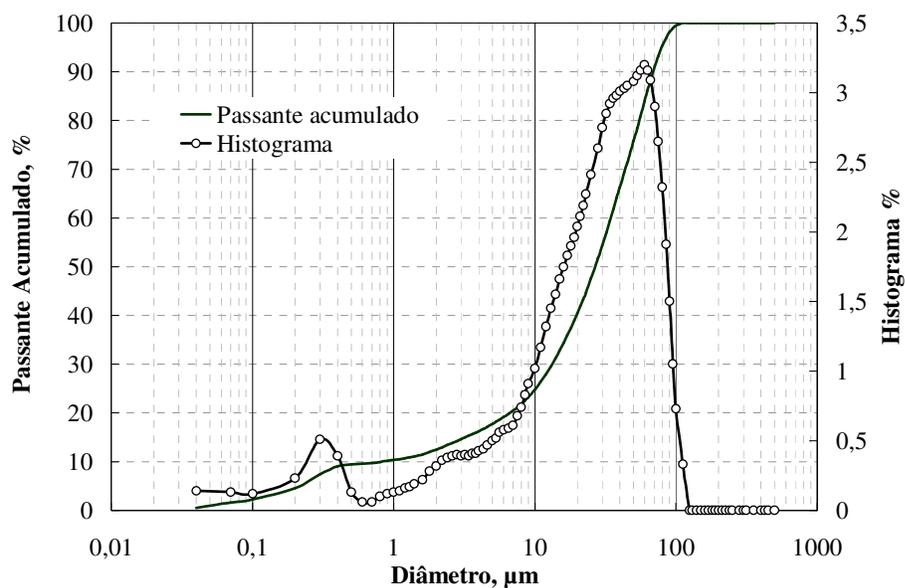


Figura 31. Distribuição granulométrica da amostra dos finos naturais dos estudos de CAI pré-flotação em nível de laboratório.

Os resultados das análises químicas das frações obtidas pelo micropeneiramento mostram o acúmulo de P_2O_5 no intervalo de 5 a 44 μm , com teores próximos a 15%, em comparação com 11,5% da amostra com todas as faixas. A Figura 32 mostra os resultados dos principais elementos.

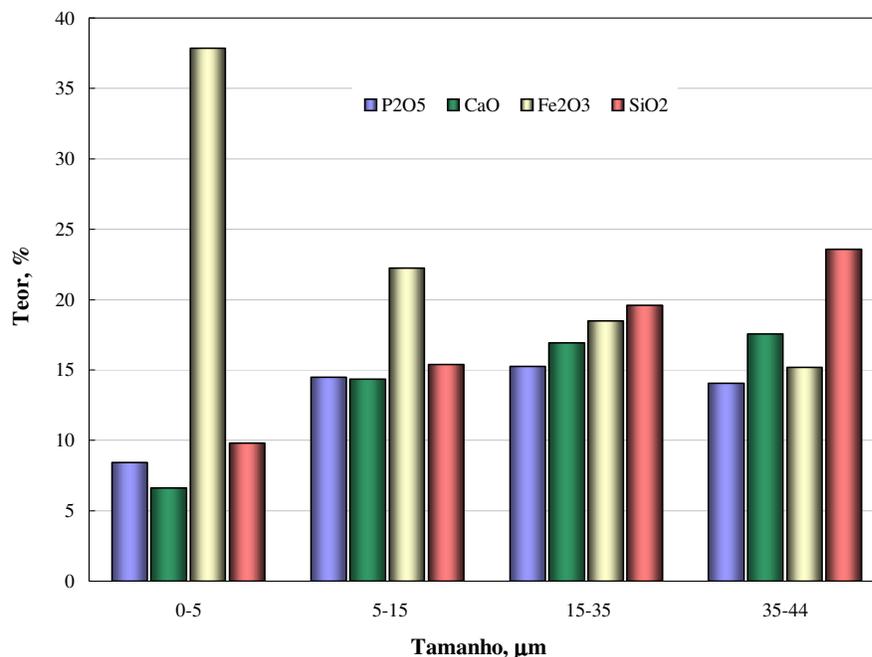


Figura 32. Teor de P_2O_5 , CaO, Fe_2O_3 e SiO_2 por faixa granulométrica na fração < 44 μm.

4.2. Estudo de flotação com CAI em escala de laboratório

Os resultados de flotação obtidos (comparativo com o ensaio STD), dos principais parâmetros, são mostrados nas Figura 33 a 36 em termos de recuperação (mássica e de apatita) e teor (P_2O_5).

Os resultados mostram que a melhor recuperação foi alcançada após o CAI a uma energia transferida de $2,5 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$ de polpa, junto com uma diminuição do teor de P_2O_5 . Esses resultados são devidos ao maior arraste dos minerais de ganga, em função da maior agregação e possível “empuxo” das partículas flotáveis. Conforme pode ser visto nas Figura 36 e Figura 37, que mostram a influência do CAI nos teores de impurezas.

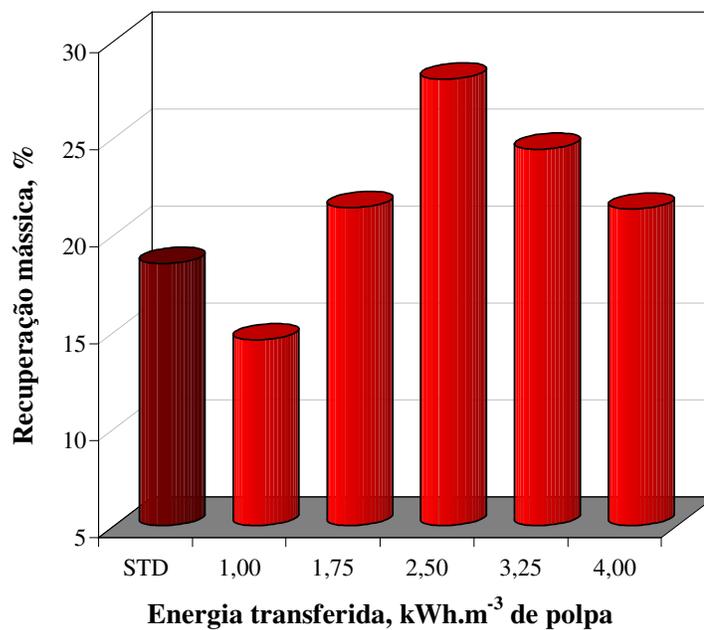


Figura 33. Efeito da quantidade de energia transferida no CAI na recuperação mássica.

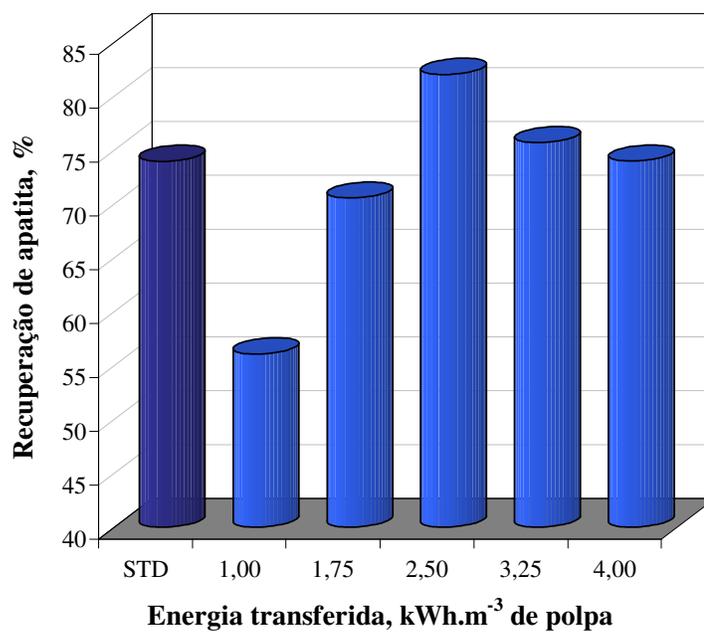


Figura 34. Efeito da quantidade de energia transferida no CAI na recuperação de apatita.

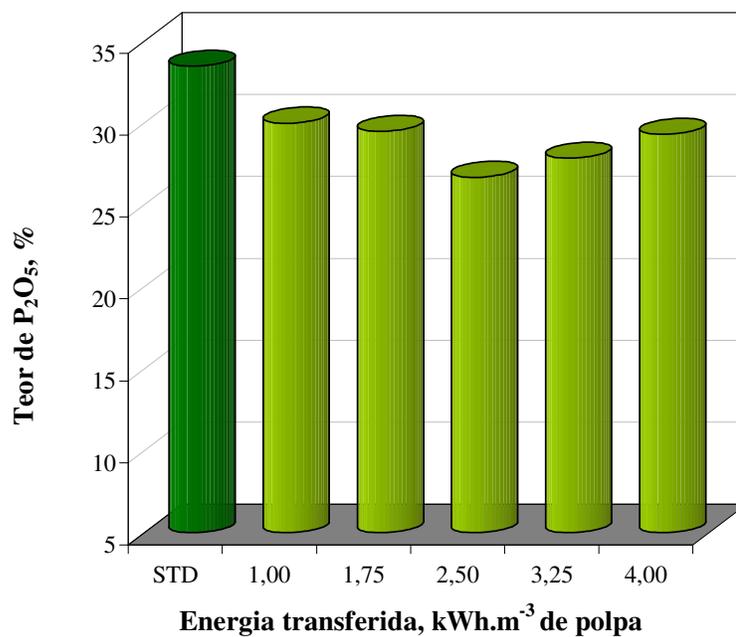


Figura 35. Efeito da quantidade de energia transferida no CAI no teor de P₂O₅.

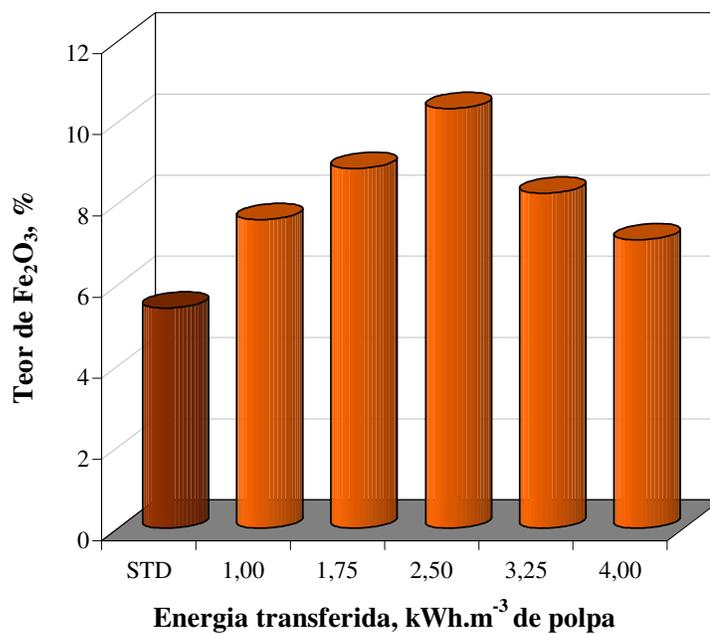


Figura 36. Efeito da quantidade de energia transferida no CAI no teor de Fe₂O₃.

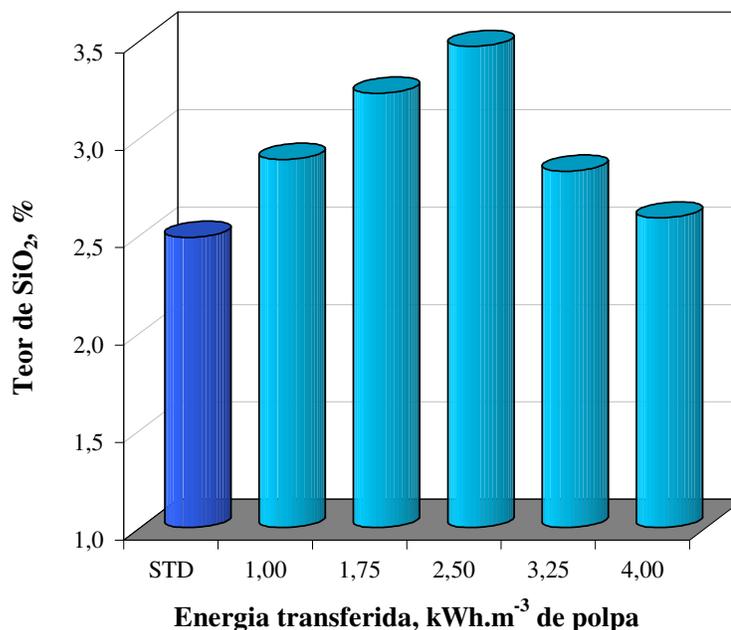


Figura 37. Efeito da quantidade de energia transferida no CAI no teor de SiO₂.

Os resultados mostram que a melhor recuperação foi alcançada com CAI a uma energia transferida de 2,5 kWh·m⁻³ de polpa onde se obteve uma recuperação mássica de 28%, a recuperação de apatita aumentou de 74% do ensaio STD para 82%. Com essa energia transferida pelo CAI foi onde ocorreu um maior arraste dos minerais de ganga, apresentando os maiores teores de Fe₂O₃ e SiO₂ no concentrado.

4.2.1. Avaliação da geometria do impelidor no CAI -Flotação

A influência da geometria do impelidor no CAI foi estudada com uma amostra de Finos Naturais cujos teores são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8. Análise química da amostra dos Finos Naturais para o estudo de avaliação do tipo de impelidor no CAI, em nível de laboratório

P ₂ O ₅	CaO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	BaSO ₄	TiO ₂	BaO	Nb ₂ O ₃	CeO ₂
14,14	13,02	27,76	10,81	2,49	0,88	0,68	4,86	2,61	0,63	0,42

A Figura 38 mostra o resultado comparativo da recuperação de apatita onde o impelidor de fluxo radial (turbina *rushton* de 6 aletas) mostrou ter um melhor desempenho em todas as energias transferidas a polpa.

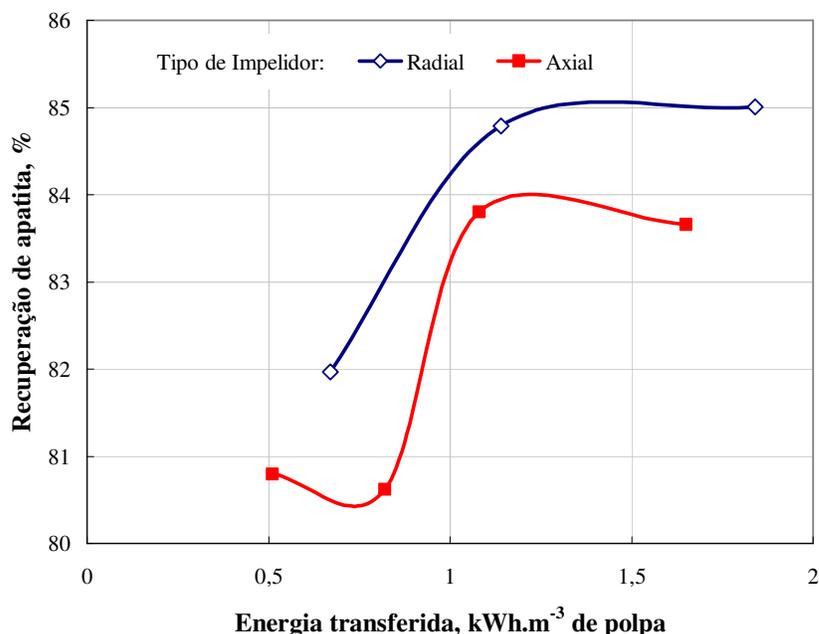


Figura 38. Recuperação de apatita para diferentes tipos de impelidores no CAI.

A Tabela 9 mostra os teores de P₂O₅ e de impurezas (Fe₂O₃ e SiO₂) dos concentrados, os quais apresentam uma variação pouco significativa entre a utilização do fluxo radial e axial no CAI.

Tabela 9. Resumo dos resultados obtidos na avaliação do tipo de impelidor no CAI

Ensaio	Energia transferida, kWh/m ³	Recuperação mássica, %	Recuperação apatita, %	Teores no concentrado, %			
				P ₂ O ₅	CaO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂
STD	0	20,8	67,4	36,2	46,2	6,1	1,0
Radial	0,67	23,8	82,0	34,0	43,1	7,5	1,4
	1,14	24,5	84,8	34,4	43,7	7,8	1,4
	1,84	26,9	85,0	35,1	45,4	6,5	1,2
	1,65	26,4	83,7	34,3	44,2	7,8	1,3
Axial	0,51	23,1	80,0	34,4	44,7	7,8	1,4
	0,82	24,9	80,6	33,0	42,3	8,4	1,4
	1,08	25,3	83,8	34,4	44,8	7,6	1,3
	1,65	26,4	83,7	34,3	44,2	7,8	1,3

O melhor desempenho na recuperação de apatita foi obtido quando utilizado o impelidor de fluxo radial (turbina *rushton* de 6 aletas) no condicionamento em alta intensidade.

4.2.2. Estudo da adição de partículas de concentrado grossas como carregadoras no CAI

Nos estudos com adição de partículas grossas de concentrado (0, 5 e 10% de GCA) houve pouca influência na recuperação. Nas Figura 39 e Figura 40 são apresentados os resultados de recuperação mássica e de apatita para diferentes concentrações. Um resumo dos resultados é apresentado na Tabela 10.

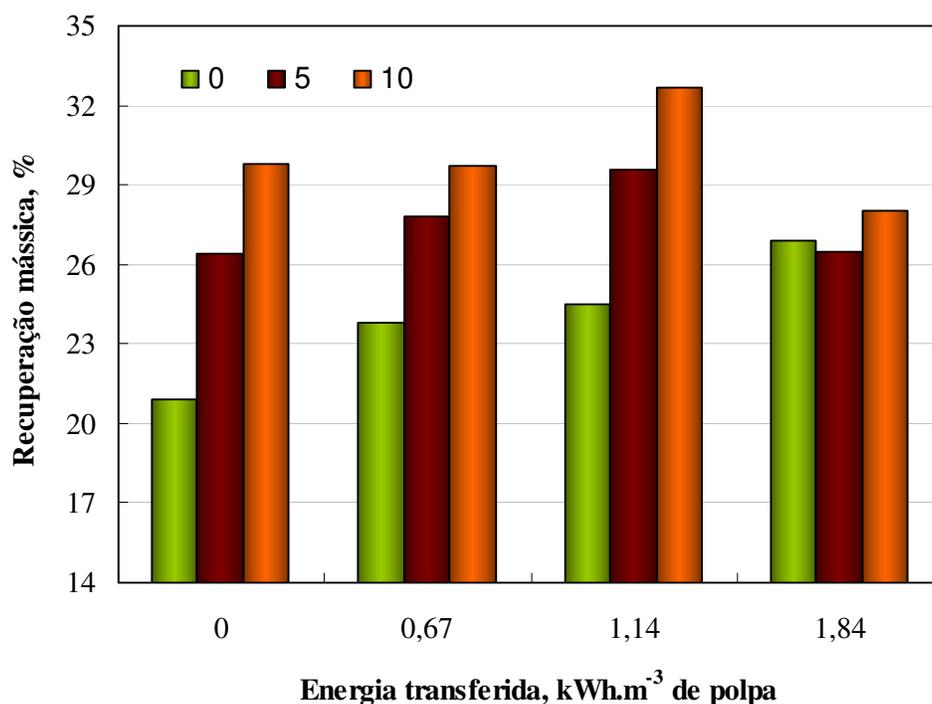


Figura 39. Efeito da energia transferida pelo CAI na recuperação mássica com adição de diferentes quantidades de GCA.

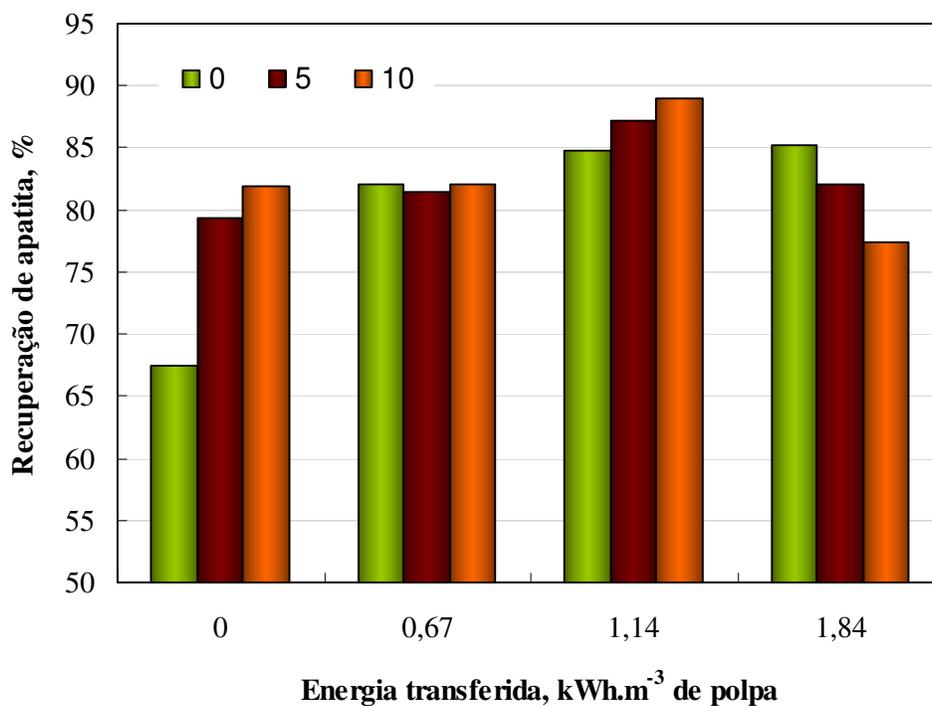


Figura 40. Efeito da energia transferida pelo CAI na recuperação de apatita com adição de diferentes quantidades de GCA.

Tabela 10. Resumo dos resultados do estudo da adição de GCA

Quantidade de GCA, %	Energia transferida, kWh/m ³	Recuperação mássica, %	Recuperação apatita, %	Teores no concentrado, %			
				P ₂ O ₅	CaO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂
0	0	20,9	67,4	36,2	46,2	6,1	1,0
	0,67	23,8	82,0	34,0	43,1	7,5	1,4
	1,14	24,5	84,8	34,4	43,7	7,8	1,4
	1,84	26,9	85,2	35,0	45,4	6,5	1,2
5	0	26,4	75,3	34,1	44,2	7,6	1,3
	0,67	27,8	77,9	32,8	43,1	7,0	1,4
	1,14	29,6	84,8	33,6	43,4	7,9	1,4
	1,84	26,5	82,1	35,4	45,6	6,9	1,2
10	0	29,8	74,4	34,5	45,1	6,3	1,2
	0,67	29,7	74,7	34,9	45,3	6,3	1,2
	1,14	32,7	84,7	34,1	44,7	6,8	1,2
	1,84	28,0	68,4	35,0	45,4	6,5	1,2

O maior ganho foi obtido adicionando 5% de GCA sem a utilização do CAI, onde houve um aumento na recuperação de apatita de 67,4 para 75,3%. Quando combinado a

adição de GCA e o CAI os ganhos de recuperação não foram tão significativos, isso devido, provavelmente, à grande recuperação mássica obtida nesses ensaios, com a flotação sendo prejudicada pela capacidade de carregamento.

4.3. Estudo de flotação com CAI em coluna piloto de 4”

Os estudos de flotação com CAI em coluna piloto de 4” foram realizados com 3 amostragens de polpa denominados AM-01, AM-02 e AM-03. A seguir são apresentados as condições operacionais e os resultados dos ensaios.

Os resultados confirmam os ganhos de recuperação obtidos no estudo em laboratório.

Amostra de polpa AM-01

A Tabela 11 mostra as variáveis operacionais nos estudos com CAI em nível com a amostra AM-01. Os resultados mostram incrementos na recuperação de apatita em todas as condições testadas, com destaque para a energia transferida à polpa de $0,26 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$ de polpa. Os teores de P_2O_5 e de impurezas mostraram pouca variação. Os resultados são apresentados na Tabela 10 e graficamente nas Figuras 41 a 45.

Tabela 11. Níveis das variáveis operacionais para os estudos com a amostra de polpa AM-01

STD 33 – CAI 2 - 5		Condições Operacionais	
Pilha	4553	[fubá de milho], $\text{g}\cdot\text{t}^{-1}$	1200
Tempo de amostragem, s	60	[ácido graxo de soja], $\text{g}\cdot\text{t}^{-1}$	40
% sólidos no CN	42	pH no CN	$12\pm 0,1$
% sólidos na alimentação	25	Q de ar, $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$	2
Tempo de residência no reator CAI, min	6,3	J_{ar} , $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$	0,52
Alimentação, $\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$	46	Q água de lavagem, $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$	1,4
h espuma, cm	62 ± 2	$J_{\text{água lavagem}}$, $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$	0,37

Tabela 12. Resumo dos resultados para os estudos com CAI com amostra de polpa AM-01

Ensaio	Energia transferida à polpa, $\text{kWh}\cdot\text{m}^{-3}$	R massa %	R Apatita %	T P_2O_5 %	T Fe_2O_3 %	T SiO_2 %
STD 33	0	25,0	86,4	32,4	8,5	2,3
CAI 2	0,06	25,2	87,1	33,4	8,1	1,9
CAI 3	0,23	25,5	89,0	31,4	8,9	1,5
CAI 4	0,56	26,0	87,2	32,6	8,7	1,7
CAI 5	0,88	27,1	87,8	32,3	8,1	1,3

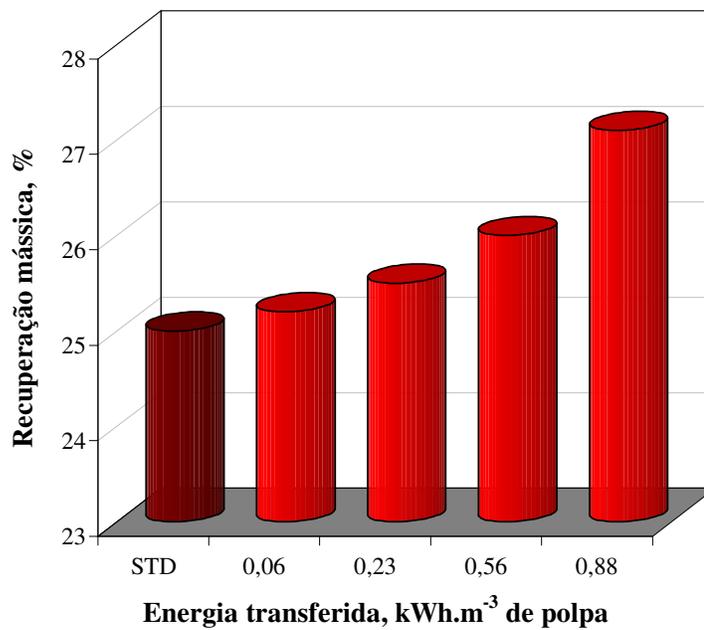


Figura 41. Efeito da quantidade de energia transferida no CAI na recuperação mássica com amostra AM-01.

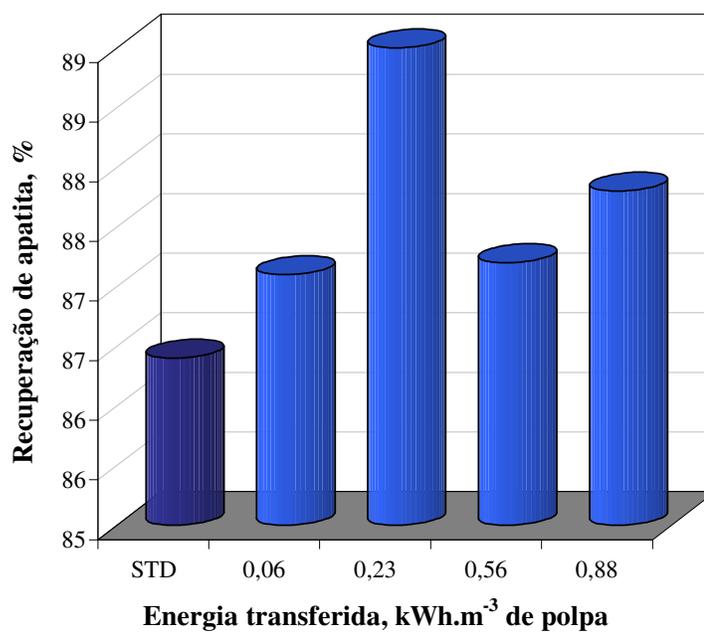


Figura 42. Efeito da quantidade de energia transferida no CAI na recuperação de apatita com amostra AM-01.

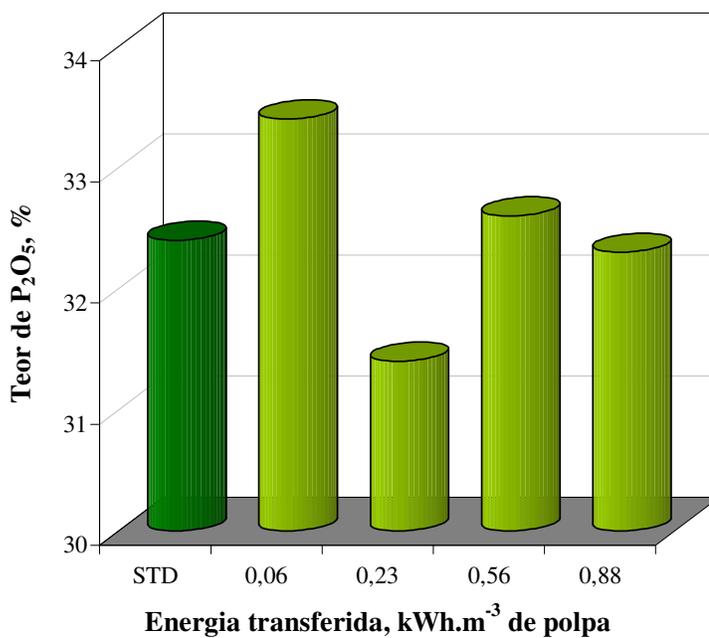


Figura 43. Efeito da quantidade de energia transferida no CAI no teor de P₂O₅ com amostra AM-01.

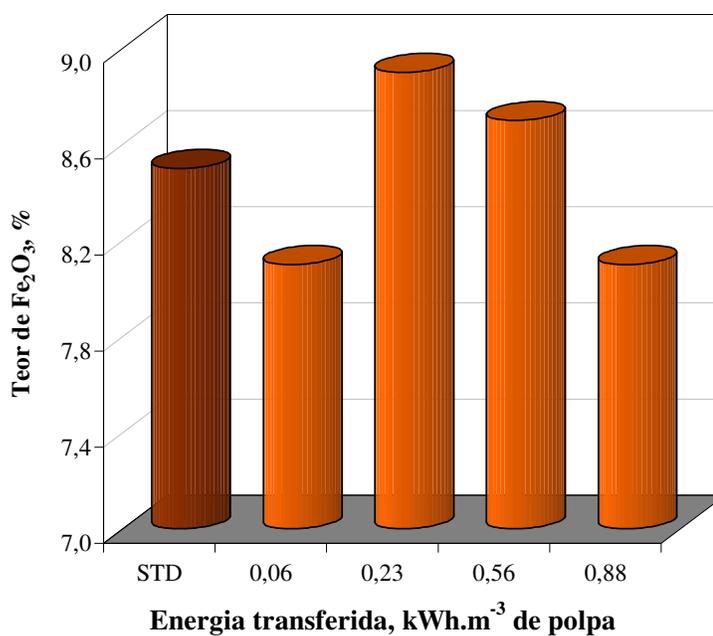


Figura 44. Efeito da quantidade de energia transferida no CAI no teor de Fe₂O₃ com amostra AM-01.

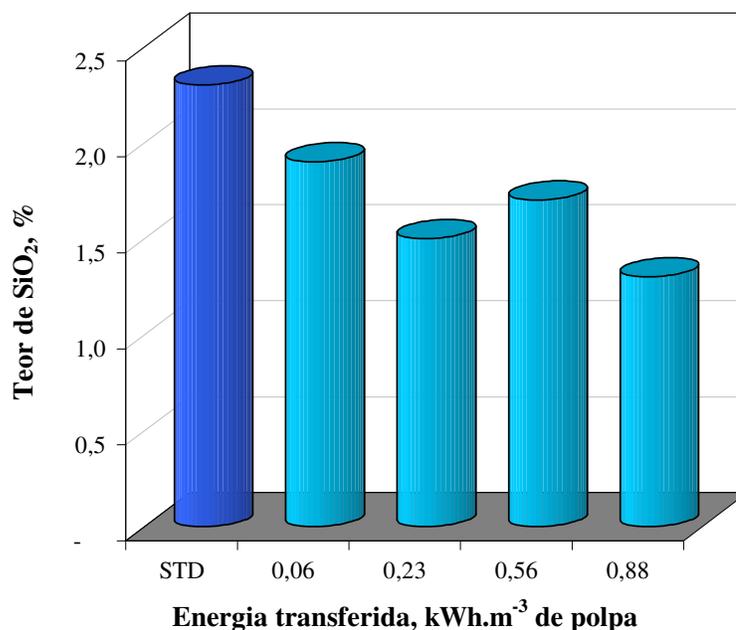


Figura 45. Efeito da quantidade de energia transferida no CAI no teor de SiO₂ com amostra AM-01.

Amostra de polpa AM-02

As condições operacionais dos ensaios realizados com a amostra de polpa AM-02 são apresentadas na Tabela 13.

Tabela 13. Níveis das variáveis operacionais para os estudos com a amostra de polpa AM-02

STD 41 – CAI 10 - 14		Condições Operacionais	
Pilha	4556	[fubá de milho], g·t ⁻¹	1600
Tempo de amostragem, s	60	[ácido graxo de soja], g·t ⁻¹	40
% sólidos no CN	42	pH no CN	12±0,1
% sólidos na alimentação	25	Q de ar, L·min ⁻¹	2
Tempo de residência no reator CAI, min	5,7	J _{ar} , cm·s ⁻¹	0,52
Alimentação, kg·h ⁻¹	43	Q água de lavagem, L·min ⁻¹	1,4
h espuma, cm	70±2	J _{água lavagem} , cm·s ⁻¹	0,37

Na Tabela 14 é apresentado um resumo dos resultados obtidos com o CAI na flotação de Finos Naturais com a amostra de polpa AM-02. A inclusão do CAI incrementou a

recuperação mássica e de apatita em todos os ensaios realizados conforme mostrado nas Figuras 46 e 47. O CAI também não prejudicou os teores de P_2O_5 e nem extrapolou os limites de impurezas (Figuras 48 a 50).

Tabela 14. Resumo dos resultados para os estudos com CAI com amostra de polpa AM-02

Ensaio	Energia transferida à polpa, $kWh \cdot m^{-3}$	R massa %	R Apatita %	T P_2O_5 %	T Fe_2O_3 %	T SiO_2 %
STD 41	0	20,9	81,8	34,7	6,2	2,1
CAI 10	0,06	21,1	82,6	35,8	6,1	2,1
CAI 11	0,23	21,9	85,8	34,3	6,9	2,2
CAI 12	0,56	23,0	86,5	34,8	7,1	2,3
CAI 13	0,88	21,8	85,3	32,8	7,2	2,1
CAI 14	1,35	23,1	84,5	33,1	7,1	2,1

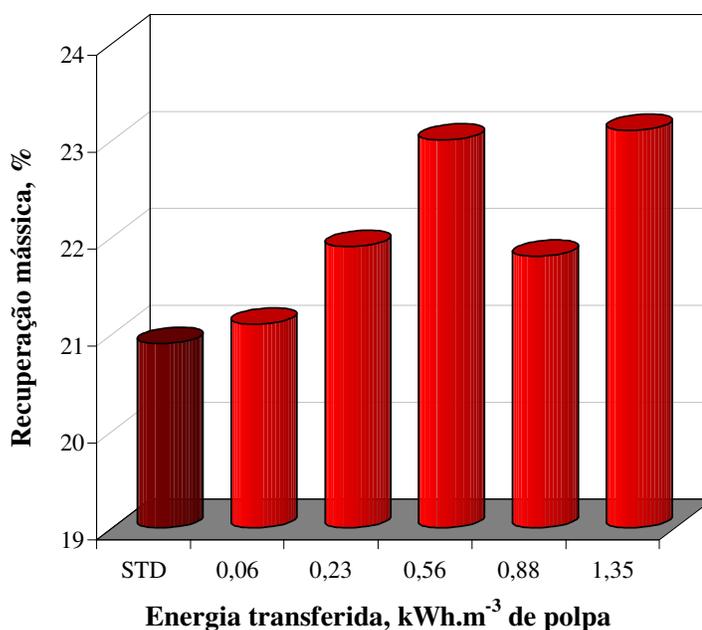


Figura 46. Efeito da quantidade de energia transferida no CAI na recuperação mássica com amostra AM-02.

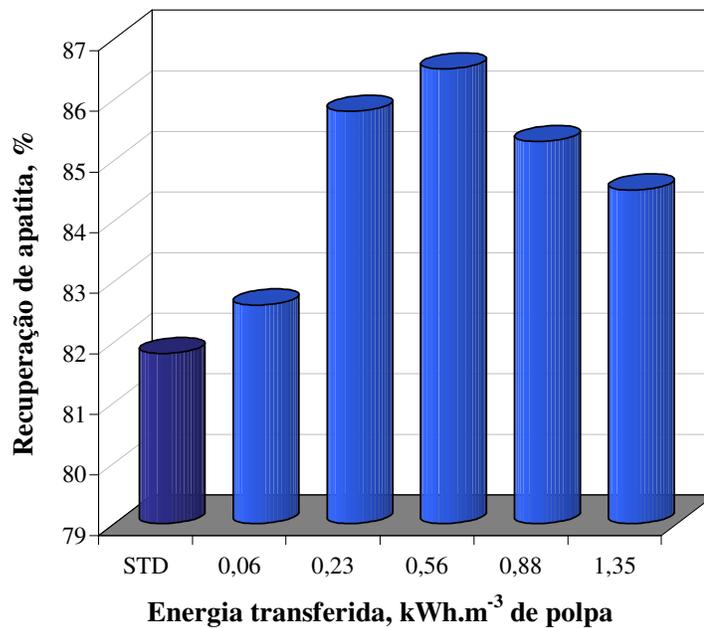


Figura 47. Efeito da quantidade de energia transferida no CAI na recuperação de CaO com amostra AM-02.

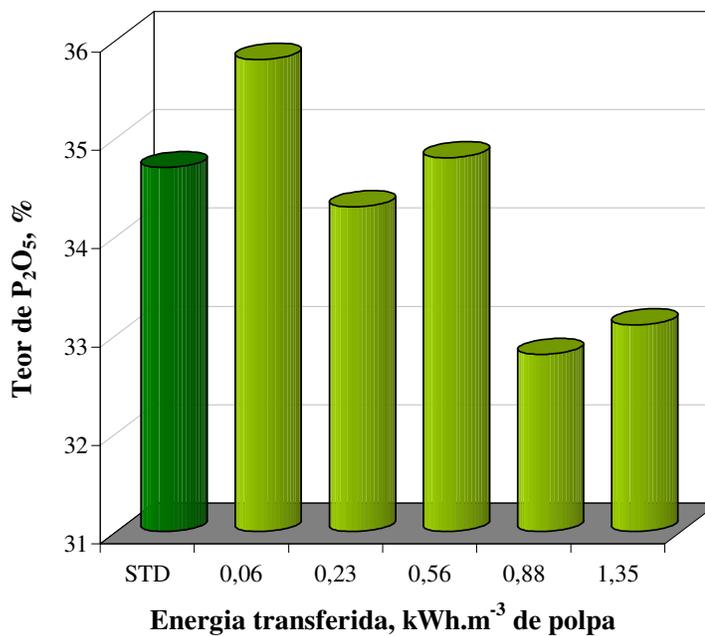


Figura 48. Efeito da quantidade de energia transferida no CAI no teor de P₂O₅ com amostra AM-02.

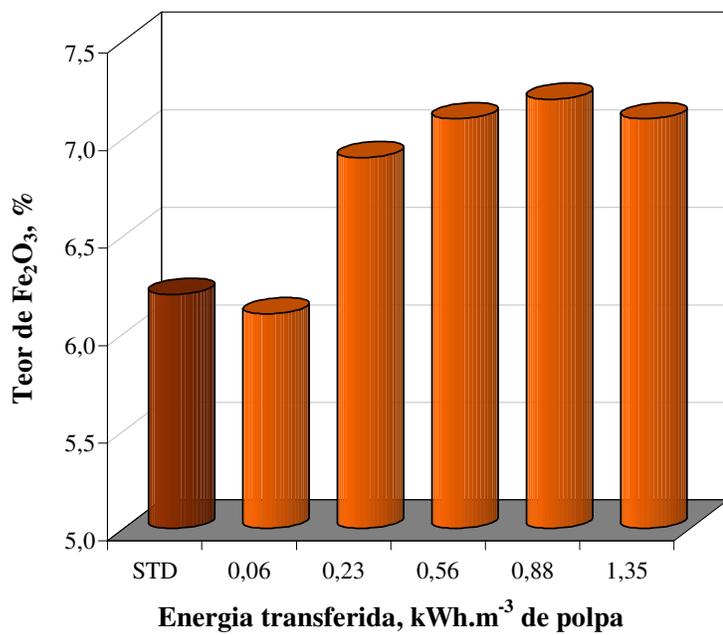


Figura 49. Efeito da quantidade de energia transferida no CAI no teor de Fe₂O₃ com amostra AM-02.

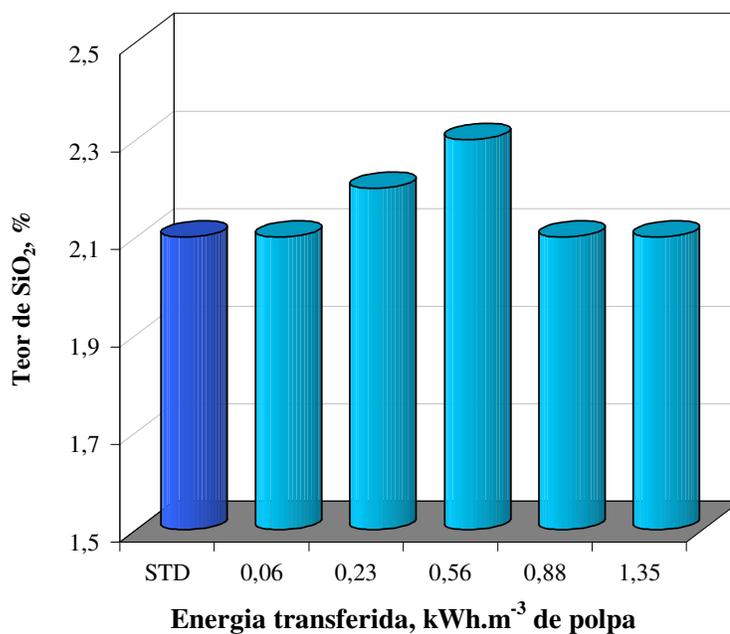


Figura 50. Efeito da quantidade de energia transferida no CAI no teor de SiO₂ com amostra AM-02.

Amostra de polpa AM-03

As condições operacionais utilizadas na flotação em coluna piloto de 4" com amostra de polpa AM-03 são apresentadas na Tabela 14 e na Tabela 16 os principais resultados.

Os estudos de CAI com a amostra AM-03 também mostram incrementos nas recuperações mássica e metalúrgica em todos os ensaios (Figuras 51 e 52), sem prejudicar os teores de P_2O_5 , inclusive com incrementos (Figura 53). Os teores de impurezas oscilaram no máximo 1% (Figuras 54 e 55), dentro do erro desses ensaios.

Tabela 15. Níveis das variáveis operacionais para os estudos com a amostra de polpa AM-03

STD 44 – 47 / CAI 15 - 19		Condições Operacionais	
Pilha	4556	[fubá de milho], $g \cdot t^{-1}$	1600
Tempo de amostragem, s	60	[ácido graxo de soja], $g \cdot t^{-1}$	40
% sólidos no CN	42	pH no CN	12±0,1
% sólidos na alimentação	25	Q de ar, $L \cdot min^{-1}$	2
Tempo de residência no reator CAI, min	5,7	J_{ar} , $cm \cdot s^{-1}$	0,52
Alimentação, $kg \cdot h^{-1}$	43	Q água de lavagem, $L \cdot min^{-1}$	1,4
h espuma, cm	70±2	$J_{água lavagem}$, $cm \cdot s^{-1}$	0,37

Tabela 16. Resumo dos resultados para os estudos com CAI com amostra de polpa AM-03

Ensaio	Energia transferida à polpa, $kWh \cdot m^{-3}$	R massa %	R Apatita %	T P_2O_5 %	T Fe_2O_3 %	T SiO_2 %
STD 44-47	0	21,5	83,5	33,4	6,5	2,1
CAI 15	0,06	22,2	84,9	33,7	6,5	2,0
CAI 16	0,23	24,1	86,6	33,9	7,6	2,3
CAI 19	0,56	23,4	87,5	34,0	7,7	2,3
CAI 18	0,88	23,3	87,7	33,3	7,4	2,5
CAI 17	1,35	23,8	86,9	32,9	7,6	2,2

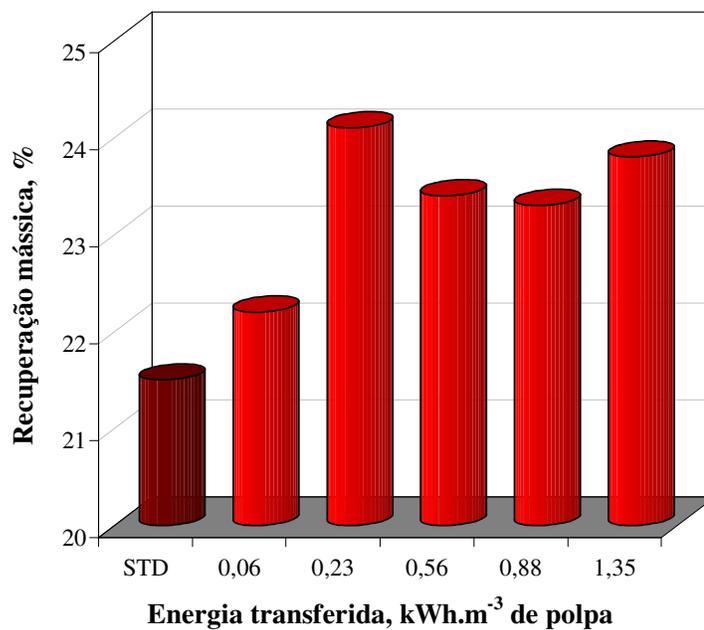


Figura 51. Efeito da quantidade de energia transferida no CAI na recuperação mássica com amostra AM-03 .

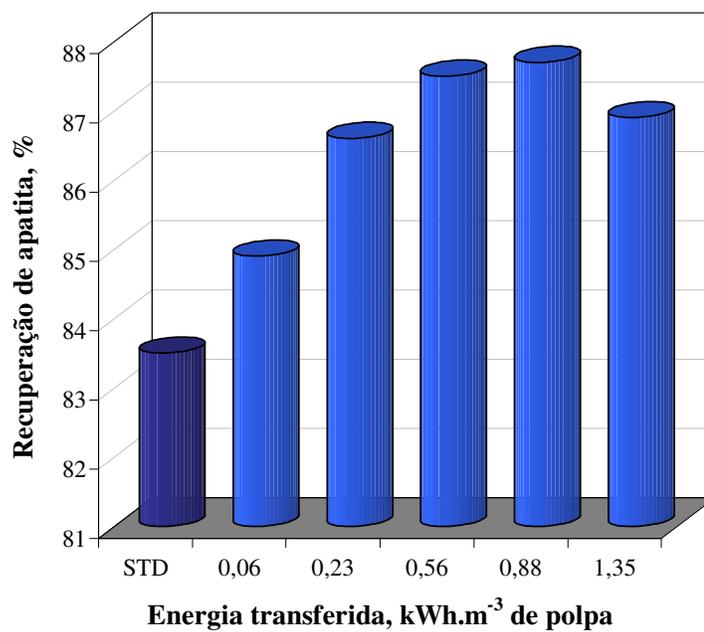


Figura 52. Efeito da quantidade de energia transferida no CAI na recuperação de apatita com amostra AM-03.

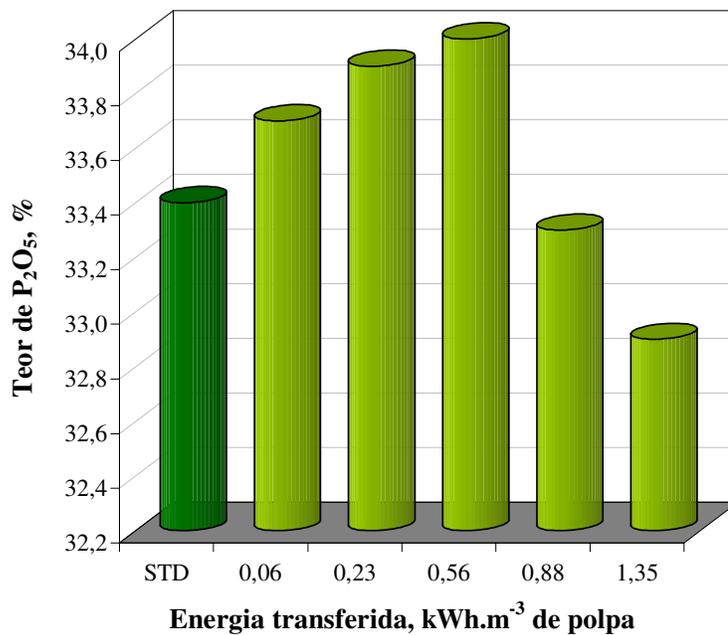


Figura 53. Efeito da quantidade de energia transferida no CAI no teor de P₂O₅ com amostra AM-03.

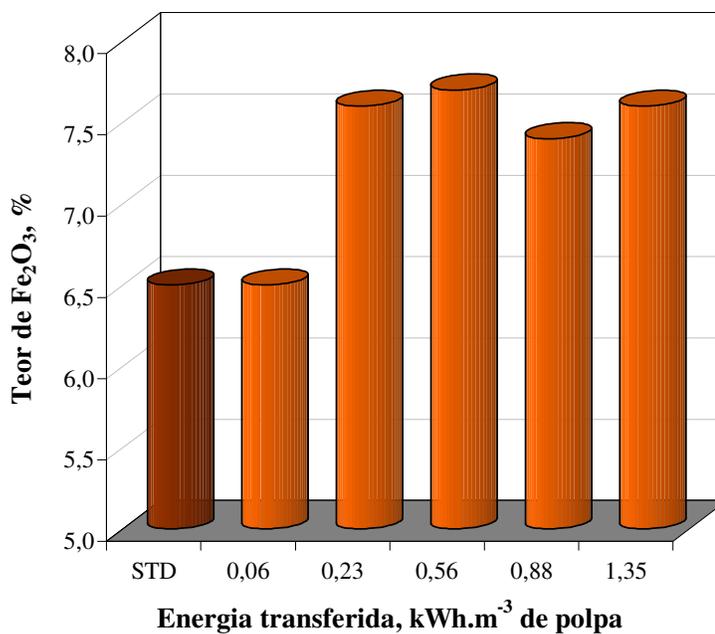


Figura 54. Efeito da quantidade de energia transferida no CAI no teor de Fe₂O₃ com amostra AM-03.

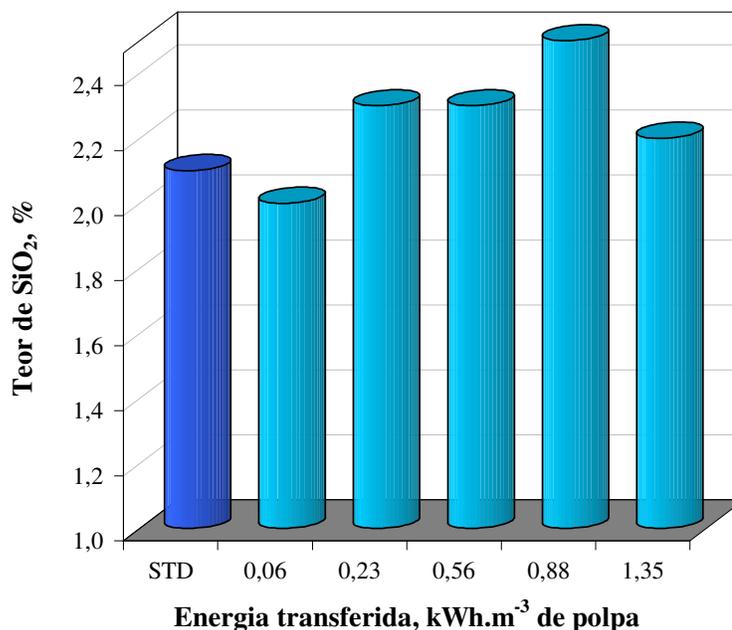


Figura 55. Efeito da quantidade de energia transferida no CAI no teor de SiO₂ com amostra AM-03.

4.4. Estudo de flotação com CAI em coluna de 24”

Os ensaios com CAI em coluna piloto de 24” foram realizados utilizando diferentes amostras de polpa referentes a diferentes pilhas de homogeneização chamados nesse trabalho de amostras de polpa AM-04 até AM-08. Para cada troca de pilha foram realizados novas análises químicas e novos ensaios *standard*. Os resultados obtidos na coluna piloto de 24” mostram um aumento na recuperação de apatita em todos os ensaios onde foi utilizado o CAI, confirmando os obtidos na coluna piloto de 4”, com um menor arraste de ganga para o concentrado.

Amostra de polpa AM-04

Os ensaios correspondentes ao estudo de flotação com CAI com a amostra de polpa AM-04, foram aqueles denominados de CAI 12 a 15 e devem ser comparados com os *Standard*, STD 26 e 27. As condições operacionais desses ensaios são mostradas na Tabela 17.

Os resultados são apresentados nas Tabelas 17 e 18, a maior recuperação foi obtida com a energia transferida a polpa pelo CAI com $0,43 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$ de polpa.

Tabela 17. Níveis das variáveis operacionais adotadas nos estudos de flotação com amostra de polpa AM-04

STD 26 e 27		Condições Operacionais	
Pilha	4798	[fubá de milho], gt^{-1}	1143
% sólidos no CN 301	45	[ácido graxo de soja], gt^{-1}	78
% sólidos na alimentação	25	Q de ar, m^3h^{-1}	8,0
Alimentação, $\text{t}\cdot\text{h}^{-1}$	2,5	J_{ar} , cms^{-1}	0,76
H espuma, cm	70 ± 1	Q água de lavagem, m^3h^{-1}	1,4
pH no CN 301	$12,0\pm 0,1$	$J_{\text{água lavagem}}$, cms^{-1}	0,16

Tabela 18. Teores na alimentação da amostra de polpa AM-04, %

P_2O_5	CaO	Fe_2O_3	SiO_2	Al_2O_3	MgO	BaSO_4	TiO_2	BaO	Nb_2O_5	CeO_2
12,5	10,9	29,9	16,9	2,6	0,8	0,1	6,1	1,7	0,5	0,6

Tabela 19. Resultados dos estudos de flotação com CAI com amostra de polpa AM-04

Ensaio	Velocidade rpm	Energia kWh/m^3	R mássica %	R CaO %	Teores nos concentrados %			
					P_2O_5	CaO	Fe_2O_3	SiO_2
STD 26 e 27	0	0	21,8	87,6	32,2	43,8	7,9	3,0
CAI 12	400	0,13	21,9	88,5	34,3	45,3	6,3	2,4
CAI 15	580	0,43	22,0	90,2	32,0	44,7	7,7	2,9
CAI 13 e 14	595	0,47	22,3	89,6	33,2	43,4	7,4	2,8

Amostra de polpa AM-05

Os ensaios correspondentes ao estudo de flotação com CAI com a amostra de polpa AM-05, foram aqueles denominados de CAI 17 a 20 e devem ser comparados com os *Standard*, STD 28 e 29. As condições operacionais desses ensaios são mostradas na Tabela 20 e os resultados são apresentados nas Tabelas 20 e 21.

Tabela 20. Níveis das variáveis operacionais adotadas nos estudos de flotação com amostra de polpa AM-05.

STD 28 e 29		Condições Operacionais	
Pilha	4798	[fubá de milho], gt^{-1}	993
% sólidos no CN 301	43	[ácido graxo de soja], gt^{-1}	60
% sólidos na alimentação	25	Q de ar, m^3h^{-1}	8,0
Alimentação, $\text{t}\cdot\text{h}^{-1}$	2,5	J_{ar} , cms^{-1}	0,76
H espuma, cm	70 ± 1	Q água de lavagem, m^3h^{-1}	1,4
pH no CN 301	$12,0\pm 0,1$	$J_{\text{água lavagem}}$, cms^{-1}	0,16

Tabela 21. Teores na alimentação da amostra de polpa AM-05, %

P ₂ O ₅	CaO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	BaSO ₄	TiO ₂	BaO	Nb ₂ O ₅	CeO ₂
11,9	10,9	30,0	16,9	2,7	1,1	0,2	6,1	1,7	0,5	0,5

Tabela 22. Resultados dos estudos de flotação com CAI com amostra de polpa AM-05

Ensaio	Velocidade rpm	Energia Kwh/m ³	R mássica %	R CaO %	Teores nos concentrados %			
					P ₂ O ₅	CaO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂
STD 28 e 29	0	0	23,9	87,7	32,0	41,1	9,2	3,8
CAI 17 e 18	550	0,31	25,1	88,6	32,3	40,7	9,3	3,4
CAI 19 e 20	610	0,47	24,8	89,0	30,8	41,9	10,0	3,6

Amostra de polpa AM-06

Os ensaios correspondentes ao estudo de flotação CAI com a amostra de polpa AM-06, foram aqueles denominados de CAI 22 a 24 e devem ser comparados com os *Standard*, STD 30 e 31. As condições operacionais desses ensaios são mostradas na Tabela 23 e os resultados nas Tabelas 23 e 24.

Tabela 23. Níveis das variáveis operacionais adotadas nos estudos de flotação com amostra de polpa AM-06.

STD 30 E 31		Condições Operacionais	
Pilha	4799	[fubá de milho], gt ⁻¹	1007
% sólidos no CN 301	43	[ácido graxo de soja], gt ⁻¹	79
% sólidos na alimentação	25	Q de ar, m ³ h ⁻¹	8,0
Alimentação, t·h ⁻¹	2,5	J _{ar} , cms ⁻¹	0,76
h espuma, cm	70±1	Q água de lavagem, m ³ h ⁻¹	1,4
pH no CN 301	12,0±0,1	J _{água lavagem} , cms ⁻¹	0,16

Tabela 24. Teores na alimentação da amostra de polpa AM-06, %

P ₂ O ₅	CaO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	BaSO ₄	TiO ₂	BaO	Nb ₂ O ₅	CeO ₂
12,5	11,7	29,4	16,9	2,7	1,2	0,2	6,2	1,6	0,5	0,5

Tabela 25. Resultados dos estudos de flotação com CAI com amostra de polpa AM-06

Ensaio	Velocidade Rpm	Energia Kwh/m ³	R mássica %	R CaO %	Teores nos concentrados %			
					P ₂ O ₅	CaO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂
STD 30 e 31	0	0	24,1	87,9	31,7	43,2	9,3	3,7
CAI 22 - 24	560	0,39	24,7	89,1	32,1	41,8	9,5	3,6

Amostra de polpa AM-07

Os ensaios correspondentes ao estudo de flotação com CAI com a amostra de polpa AM-07, foram aqueles denominados de CAI 8 e 9 e devem ser comparados com os Standard, STD 22 e 23. As condições operacionais desses ensaios são mostradas na Tabela 26 e os resultados nas Tabelas 26 e 27.

Tabela 26. Níveis das variáveis operacionais adotadas nos estudos de flotação com amostra de polpa AM-07.

STD 22 E 23		Condições Operacionais	
Pilha	4795	[fubá de milho], gt^{-1}	980
% sólidos no CN 301	43	[ácido graxo de soja], gt^{-1}	60
% sólidos na alimentação	25	Q de ar, m^3h^{-1}	8,0
Alimentação, $t \cdot h^{-1}$	2,5	J_{ar} , cms^{-1}	0,76
h espuma, cm	70±1	Q água de lavagem, m^3h^{-1}	1,4
pH no CN 301	11,9±0,1	$J_{água\ lavagem}$, cms^{-1}	0,16

Tabela 27. Teores na alimentação da amostra de polpa AM-07, %

P ₂ O ₅	CaO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	BaSO ₄	TiO ₂	BaO	Nb ₂ O ₅	CeO ₂
12,6	11,4	30,4	15,2	2,7	1,3	0,1	5,7	1,9	0,4	0,5

Tabela 28. Resultados dos estudos de flotação com CAI com amostra de polpa AM-07

Ensaio	Velocidade Rpm	Energia Kwh/m ³	R mássica %	R CaO %	Teores nos concentrados %			
					P ₂ O ₅	CaO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂
STD 22 e 23	0	0	20,6	78,3	33,8	44,3	7,4	2,6
CAI 8 e 9	550	0,33	20,2	79,3	33,5	44,3	7,5	2,6

Amostra de polpa AM-08

Os ensaios correspondentes ao estudo de flotação com CAI com a amostra de polpa AM-08, foram aqueles denominados de CAI 10 e 11 e devem ser comparados com os Standard, STD 24 e 25. As condições operacionais desses ensaios são mostradas na Tabela 29 e os resultados nas Tabelas 29 e 30.

Tabela 29. Níveis das variáveis operacionais adotadas nos estudos de flotação com amostra de polpa AM-08

STD 24 E 25		Condições Operacionais	
Pilha	4798	[fubá de milho], gt^{-1}	1035
% sólidos no CN 301	45	[ácido graxo de soja], gt^{-1}	60
% sólidos na alimentação	25	Q de ar, m^3h^{-1}	8,0
Alimentação, $t \cdot h^{-1}$	2,5	J_{ar} , cms^{-1}	0,76
h espuma, cm	70±1	Q água de lavagem, m^3h^{-1}	1,4
pH no CN 301	12,0±0,1	$J_{água\ lavagem}$, cms^{-1}	0,16

Tabela 30. Teores na alimentação da amostra de polpa AM-08, %

P ₂ O ₅	CaO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	BaSO ₄	TiO ₂	BaO	Nb ₂ O ₅	CeO ₂
12,3	10,9	29,7	17,0	2,6	0,7	0,1	6,1	1,8	0,5	0,6

Tabela 31. Resultados dos estudos de flotação com CAI com amostra de polpa AM-08

Ensaio	Velocidade rpm	Energia Kwh/m ³	R mássica %	R CaO %	Teores no concentrado %			
					P ₂ O ₅	CaO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂
STD 24 e 25	0	0	16,1	70,1	35,7	47,4	5,4	2,0
CAI 10 e 11	500	0,28	17,7	74,9	36,1	46,9	6,0	2,1

5. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos permitem estabelecer as seguintes conclusões:

1. O estudo em nível de bancada e piloto com CAI, mostrou incrementos na recuperação de apatita de no mínimo 2%, sendo que os melhores resultados foram de um incremento de 4,8%, sem qualquer contaminação do concentrado. Os dados de teores de CaO, Fe₂O₃ e SiO₂, nos rejeitos, comprovam esses aumentos metalúrgicos revelando a alta seletividade desta técnica.

2. Em nível de laboratório a condição com melhor recuperação foi atingida utilizando o CAI a uma energia transferida de 2,5 kWh·m⁻³ de polpa. Nesta escala foram obtidos incrementos da ordem de 9% na recuperação de apatita, porém houve um decréscimo no teor de P₂O₅ de 6,2% com aumento nos teores de impurezas de 5% para o Fe₂O₃ e 1% para SiO₂. Também foi constatado que para o CAI é mais eficiente o uso de um impelidor que provoque um fluxo radial no reator. A recuperação de apatita quando utilizada a turbina *rushton* de 6 aletas para fluxo radial foi sempre superior quando comparada ao impelidor tipo naval, de fluxo axial. A incorporação de grossos com alta flotabilidade na flotação de finos de fosfato aumentou a recuperação de apatita na flotação em 8,7%, quando adicionado 5% de partículas grossas e 16,2% quando adicionado 10%. Adicionando os grossos e utilizando o CAI não houve aumento na recuperação, possivelmente devido à destruição dos agregados com a energia transferida a polpa utilizada nessa condição.

3. Em nível piloto, a recuperação de apatita aumentou com a inclusão do CAI em todos os experimentos, com destaque para a energia transferida a polpa de 0,23 a 0,56 kWh·m⁻³ onde houve os maiores ganhos da recuperação de apatita com incrementos acima de no mínimo 2,5% nos estudos de flotação em coluna piloto de 4". No estudo em coluna piloto de 24" utilizando o CAI com energias transferidas a polpa de 0,28 a 0,47 kWh·m⁻³ de polpa a recuperação de apatita aumentou no mínimo 1% e nos melhores resultados o ganho foi de 4,8% quando comparado com a flotação *Standard*.

4. Com base nos resultados do estudo é recomendada a inclusão de um condicionador de alta intensidade na obtenção de uma maior recuperação das partículas finas e ultrafinas de fosfato na flotação de Finos Naturais. São recomendados como parâmetros construtivos a utilização de tanque com defletores, a utilização do impelidor de fluxo radial, e energia transferida a polpa entre 0,3 a 0,5 kWh·m⁻³ de polpa.

6. ESTUDOS FUTUROS

1. Avaliação da adição de partículas com alta flotabilidade em diferentes concentrações e granulometrias.

2. Efeito na flotação da utilização do CAI com polpas pré-floculadas;

3. Estudo de flotação com CAI em polpas não deslamadas;

4. Comprovação experimental do fenômeno de agregação e limpeza superficial provocado pelo CAI.

5. Analisar comportamento hidrodinâmico do CAI através de Fluidodinâmica computacional (Computational fluid dynamics - CFD).

7. REFERÊNCIAS

- AHMED, N.; JAMESON, G.J. **Flotation Kinetics** – Mineral Processing and Extrative Metallurgy Review, Vol. 5, pp.77-99, 1989.
- ALDRICH, C.; FENG, D. **Effect of high-intensity (pre)conditioning of pulp on the flotation of sulphide ores** . Proceedings of the XXI International Mineral Processing Congress B8a-152-157, 2000.
- ARAUJO, A. C.; VIANA, P.R.M.; PERES, A.E.C. **Flotation Machines in Brazil – Columns versus Mechanical Cells**. Em: Centenary of Flotation Symposium, 2005, Brisbane. Proceedings of the Centenary of Flotation Symposium. Carlton, VIC., Australia : The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, v. único. p. 187-192, 2005.
- ATEŞOK, G.; BOYLU, F.; ÇELİK, M.S., - **Carrier flotation for desulfurization and deashing of difficult-to-float coals**. Mineral Engineering, Vol 14, No 6. pp.661-670, 2001.
- BARROS,LA.F. **Concentração de minérios fosfáticos em Teoria e Prática do Tratamento de Minérios**, Vol. 4. Flotação O Estado da Arte no Brasil. Ed. Chaves, A.P. pg 83-121, 2006
- BOS, J. L.; QUAST, K. B. **Effects of oils and lubricants on the flotation of copper sulphide minerals**. Minerals Engineering, Vol. 13, Nº 14-15, pp. 1623-1627, 2000.
- BRUM I. S., VALDERRAMA L.; RUBIO J. - **Condicionamento turbulento para a recuperação de finos de minérios por flotação** - XVI Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Hidrometalurgia V1, 1997.
- BULATOVIC, S. M.; WYSLOUZIL, D. M. **Development and application of new technology for the treatment of complex massive sulphide ores case study – Faro lead/zinc concentrator – Yukon** - Minerals Engineering, Vol. 12, No. 2, pp. 129-145, 1999.
- CAPPONI, F. **Avanços na recuperação de finos de minérios pelo processo de flotação “extensora”, o caso da mina de Chuquicamata** – Dissertação de Mestrado, Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais, PPGEM, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, 2005.
- CHEN, G.; GRANO, S; SOBIERAJ, S.; RALSTON, J. - **The effect of high intensity conditioning on the flotation of nickel ore, Part 1. size-by-size analysis**. Minerals Engineering v12 n°10 pp1185-1200, 1999. (a)
- CHEN, G.; GRANO, S; SOBIERAJ, S.; RALSTON, J; - **The effect of high intensity conditioning on the flotation of nickel ore, Part 2. mechanisms**. Minerals Engineering v12 n°11 pp1359-1373, 1999. (b)
- CLAYTON, R., JAMESON, G.J., MANLAPIG, E.V., **The development and application of the Jameson cell**. Minerals Engineering 4, 925–933. 1991.

- COLLINS, G. L., JAMESON, G.L. **Experiments on the flotation of fine particles. The influence of particles size and charge.** Chem. Eng. Sci., v.31, p. 985-991, 1976.
- CHIA, Y.H.;SOMASUNDARAM, P. **A theoretical approach to flocculation in carrier flotation for beneficiation of clay.** Colloids and Surfaces, V. 8, pp 187-202, 1983.
- DAVIS, B.E.; HOOD, G.D. **Conditioning parameter effects on the recovery of coarse phosphate** – Minerals and Metallurgical Processing, pp 50-54, February, 1994.
- DE WITT, C.C. **Froth flotation concentration** – Industrial and Engineering Chemistry. Separations Operations. Vol 32 No 5, 1940.
- DMTRIEVA, G.M.; SOLNYSHKIN, V.I.; SHMIDT, EL. V. **The influence of certain non polar reactive on the flotation of chalcopyrite.** In: Flotation agents and effects, ed G.M. Solnyshkin, Israel Program for Scientific Translations, pp. 25-32, 1970.
- EK, C. **Flotation kinetics. In: Innovations in flotation technology.** P. Mavros and K. A. Matis (Eds), pp. 183-210, 1992.
- ENGEL, M. D.; MIDDLEBROOK, P. D.; JAMESON, G.J. - **Advanced in the study of high intensity conditioning as a means of improving mineral flotation performance.** Minerals Engineering v10 pp55-68, 1997.
- FINCH, J. **Column flotation: A selected review-Part IV: Novel flotation devices.** Minerals Engineering, 8, pp. 587-602, 1995.
- FUERSTENAU, D. W. **Flotation science and engineering: advances and challenges.** Proceedings XVI International Mineral Processing Congress. Ed. Fossberg, K.S.E. Part A, pp 63-80, 1988.
- FUERSTENAU, D. W.; LI, C.; HANSON, J. S. **Enhancement of fine hematite flotation by shear flocculation and carrier flotation.** In Proceedings of XVII International Mineral Processing Congress, Dresden, Alemanha, Vol. 2, pp. 169-180, 1991.
- GORODETSKII, M.I.; LASCHENCO, N.N.; PLAKSA, N.Y.; MEKLER, L.I.; GOL'MAN, A.M. **Increase in flotation recovery of porphyry copper ores at the Balkhash concentrator.** In: Proceedings of X International Mineral Processing Congress, pp. 689-705, 1973.
- GRÄSBERG, M.;MATTSON, K. – **Novel process at Yxsjöberg, a pointer towards future more sophisticated flotation methods.** In Proceedings of 13th International Mineral Processing Congress, ed. J. Laskowski, Warsw, pp.294-315, 1979.
- GREENE, E.W.; DUKE, J.B. **Selective froth flotation of ultrafine minerals or slimes.** Transactions AIME, v. 223, p 389, 1962.
- GRUBER, G. A. **Anionic Conditioning for Phosphate Flotation** – Cap. 26 em Beneficiation of Phosphates: Advanced in Research and Practice – Editors: Zhang, P.; El-Shall, H. and Wiegel, R., pp.303-323, 1999.

- GUIMARÃES, R.C.; ARAUJO, A.C.; PERES, A.E.C. – **Reagents in igneous phosphate ores flotation** – Minerals Engineering 18, pp 199-204, 2005.
- HONAKER, R.Q.; MOHANTY, M.K. **A comparative evaluation of the leading advanced flotation technology**. Minerals Engineering, 12, p.1-13, 1999.
- HONAKER, R.Q.; MOHANTY, M.K. **Enhanced column flotation performance for fine coal cleaning**. Minerals Engineering, 9, p. 931-945, 1996.
- JORDAN, C. E.; SPEARS, D. R. **Evaluation of turbulent flow model for fine-bubble and fineparticle flotation**. Mineral and Metallurgical Processing, pp. 65-73, May, 1990.
- KING, R.P. **Flotation of fine particles**, In: Principles of Flotation, Ed. King, R. P., South Africa Institute of Mining and Metallurgy, Johannesburg, pp. 215-226, 1982.
- KOH, P.T.L.; WARREN, L.J. **Flotation of an ultrafine scheelite ore and the effect of shear-flocculation** – Proceedings 13th International Mineral Processing Congress pp 263-321, Warsaw, 1979.
- LAPIDO-LOUREIRO, F. E. V.; MELAMED, R. – **O fósforo na agricultura brasileira: uma abordagem minero-metalúrgica** – Série estudos e documentos. – VERSÃO PROVISÓRIA, 2007.
- LASKOWSKI, J. S. – **Conditioning in flotation processes** – Balkan Mineral Congress pp 21-31, 2007.
- LASKOWSKI, J.S. - **Oil assisted fine particle processing**. En: Fuerstenau D.W. (advisory editor). *Developments in Mineral Processing*, v.12: Laskowski, J.S. and Ralston, J. (Eds.) Colloid Chemistry in Mineral Processing. Elsevier, pp. 361-394, 1992.
- LEAL FILHO, L.S., SEIDL, P.R., CORREIA, J.C.G., CERQUEIRA, L.C.K., **Molecular modelling of reagents for flotation processes**. Minerals Engineering, Vol. 13, No. 14-15, pp. 1495-1503, 2000.
- LOPES, A.S.; SILVA, C.A.P.; BASTOS, A.R.R. – **Reservas de fosfatos e produção de fertilizantes fosfatados no Brasil e no mundo** – em Fósforo na Agricultura Brasileira Eds Yamada, T. e Abdalla, S.R.S. - Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 2004.
- LU, S.; DAI, Z. **Separation of ultrafine mineral particles by hydrofobic aggregation methods**. In Proceedings of Symposium on the Production and Processing of fine Particles. Ottawa, Canadá. Canadian Institute of Mining and Metallurgical, Vol. 17, pp. 309-316, 1988.
- MATIOLO, E – **Recuperação otimizada de finos de minérios de cobre e molibidênio por flotação não convencional**. Dissertação de mestrado – Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais - PPGEM/UFRGS, Porto Alegre, 2005.

- NEGERI, T.; BOISCLAIR, M; COTNOIR, D - **Flotation pulp conditioning intensity determination and scale-up considerations**. International Mineral Processing Congress Turkey, 2006.
- OZKAN, A; USLU, Z; DUZYOL, S; UCBEYIAY, H – **Correlation of shear flocculation of some salt-type minerals with their wettability parameter** – Chemical Engineering and Processing, 2006.
- OLDSHUE, J.Y. **Fluid Mixing Technology** –Mcgraw-Hill, 564 p., 1983.
- PERES, A.E.C.; CORREA, M. I. **Depression Of Iron Oxides With Corn Starches** - Minerals Engineering, Vol. 9, No. 12, pp. 1227-1234, 1996.
- PERRY, R.H.; GREEN, D.W. EDS. - **Perry's Chemical Engineers Handbook**, 7th Edition, McGraw-Hill, New York, 1997.
- PEASE, J.D.; CURRY, D.C.; YOUNG, M.F. **Designing flotation circuits for high fines recovery**. Minerals Engineering. Article in press, 2005.
- RODRIGUES, R.T. **Desenvolvimento da Técnica LTM-BSizer para a caracterização de bolhas e avaliação de parâmetros no processo de flotação** -Tese de Doutorado, Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais, PPGEM, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, 2004.
- RODRIGUES, R. T.; RUBIO, J. - **DAF-dissolved air flotation: Potential applications in the mining and mineral processing industry**. International Journal of Mineral Processing. v. 82, p. 1-13, 2007.
- RODRIGUES, R. T.; RUBIO, J. **New basis for measuring the size distribution of bubbles** Minerals Engineering 16 pp. 757–765, 2003.
- ROSA, J.J. **O condicionamento à alta intensidade e a recuperação de finos de minérios por flotação** – Dissertação de Mestrado, Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais, PPGEM, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, 1997.
- ROSA, J.J.; RODRIGUES R.T.; RUBIO, J. **Condicionamento em alta intensidade para aumentar a recuperação de finos de minérios por flotação**. Anais XVII Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa e I Seminário de Química de Colóides aplicada à Tecnologia Mineral. Águas de São Pedro, SP-Brasil. v. 2, pp 521-542, 1998.
- RUBIO, J. **Carvão Mineral** – Caracterização e Beneficiamento. Vol. 1, Ed. Nova Linha Artes Gráficas, 1988.
- RUBIO J.; BRUM I. S - **The conditioning effect on the flotation of copper/molybdenum sulphides mineral particles** - Memorias del IV Encuentro del Hemisferio Sur sobre Tecnologia Mineral y III Congresso Latinoamericano de Flotación, 1994.

- RUBIO, J. **Unconventional flocculation and flotation techniques** em Ralston, J.; Miller, J. E Rubio, J (Editores), Flotation and flocculation: From Fundamentals to Applications, Proceedings from Strategic Conference and Workshop, Hawaii 2002, pp 17-32, 2002.
- RUBIO, J.; CAPPONI, F.; MATIOLO, E.; ROSA, J. J. **Avanços na flotação de finos de minérios sulfetados de cobre e molibdênio**. XX Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa, Florianópolis, SC, 15-18 de junho 2004, v. 2, Sessão 7-Flotação, p. 69-78,2004.
- RUBIO, J.; CAPPONI, F.; TEIXEIRA, R. T.; MATIOLO E.- **Enhanced flotation of sulfide fines using the emulsified oil extender technique**. International Journal of Mineral Processing - v. 84, n. 1-4, p. 41-50, 2007.
- RUBIO, J.; HOBERG, H. **The process of separation of fine mineral particles by flotation with hydrophobic polymeric carrier**. International Journal of Mineral Processing, Vol. 37, pp. 109-122, 1993.
- SCHULZE, H.J., **Flotation as a heterocoagulation process: possibilities of calculating the probability of flotation**. In: Dobias, B. (Ed.), Coagulation and Flocculation. Marcel Dekker, New York, pp. 321–353, 1993.
- SCHULZE, H. J. – **Hydrodynamics of Bubble-Mineral Particle Collisions** – em Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, Vol. 5, pp. 43-76, 1989.
- SIS, H. E CHANDER, S. **Reagents used in the flotation of phosphate ores: a critical review** – Minerals Engineering, 16 pp. 577-585, 2003.
- SMITH, P.G.; WARREN L.J. – **Entrainment of Particles into Flotation Froths** – em Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, Vol. 5, pp. 123-145, 1989.
- SPEARS, D.R.; STANLEY, D.A. **Study of shear-flocculation of silica**, Minerals and Metallurgical Processing, 11 (1), pp. 5-11, 1994.
- STAUFFER, M.D; SULEWSKI, G. – **Fósforo – Essencial para a vida** - em Fósforo na Agricultura Brasileira Eds Yamada, T. e Abdalla, S.R.S. - Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 2004.
- SUBRAHMANYAM, T.V.; FORSSBERG, K.S.E. – **Fine particles processing: shear-flocculation and carrier flotation – a review** – International Journal of Mineral Processing, 30 pp 265-286, 1990.
- TABOSA, E.O. **Flotação com reciclo de concentrados (FRC) para recuperação de finos de minérios: fundamentos e aplicações** - Dissertação de Mestrado, Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais, PPGEM, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, 2007.
- TAKATA, L.A. – **Flotação em coluna** – em Teoria e Prática do Tratamento de Minérios, Vol. 4. Flotação – O Estado da Arte no Brasil. Ed. Chaves, A.P. pg 45-71, 2006.

- TESTA, F.; CAPPONI, F.; RUBIO J. - **Estudios de flotación no convencional de partículas finas de sulfuros de cobre y molibdeno** - em Revista de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Atacama, N° 22, 2008.
- TOMI, D.T., BAGSTER, D.F. **The behavior of aggregates in stirred vessels: I. Theoretical considerations on the effects of agitation; II. An experimental study of the flocculation of galena in a stirred tank** Trans. Inst. Chem. Eng., V56, pp.1-8;9-18 1978
- TRAHAR, W.J. **A rational interpretation of role of particle size in flotation.** International Journal of Mineral Processing, v.2, pp. 289-327, 1981.
- TRAHAR, W.J.; WARREN, L.J. **The flotability of very fine particles — A review.** International Journal of Mineral Processing, Volume 3, Issue 2, Pages 103-131, 1976.
- VALDERRAMA, L. C. **Estudos de flotação não convencional para o tratamento de rejeitos de ouro.** Tese de Doutorado – Escola de Engenharia, Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, PPGEM, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, 124 p, 1997.
- VALDERRAMA, L.; RUBIO, J. - **High intensity conditioning and the carrier flotation of gold fine particle.** International Journal of Mineral Processing, v.52, pp. 273-258, 1998.
- VALDERRAMA, L.; PÉREZ, C.; RUBIO, J. **High intensity conditioning to improve flotation of gold fine particles** XX International Mineral Processing Congress– V4 1997.
- VALDERRAMA, L; PAVES, O.; L.; PÉREZ, C.; RUBIO, J - **Shear Conditioning to Improve Flotation of Gold Fine Particles.** Memorias del IV Encuentro del Hemisferio Sur sobre Tecnología Mineral y III Congreso Latinoamericano de Flotación. 1994.
- VALDERRAMA, L.; GUZMÁN, D.; ZAZZALI, B. – **Efecto de la hélice en la recuperación de partículas finas de cobre y oro en relaves** . Anais do VI SHMMT e XVIII Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa, Rio de Janeiro, 2001.
- WARREN, L.J. **Shear-flocculation of ultrafine scheelite in sodium oleate solutions** - Journal of Colloid and Interface Science, Volume 50, Issue 2, Pages 307-318, 1975.
- WARREN, L.J. **Flocculation of stirred suspensions of cassiterite and tourmaline** – Colloids and Surfaces 5. pp. 301-319, 1982.
- WEI, S.; YUE-HUA, H.; JING-PING, D.; RUN-QING, L. - **Observation of fine particle aggregating behavior induced by high intensity conditioning using high speed CCD** . Transactions of Nonferrous Metals Society of China v16 pp198-202, 2006.
- YOON, R. H.; LUTTRELL, G. H. **The effect of bubble size on fine particle flotation.** Frothing in flotation. Ed. Janusz S. Laskowski, pp. 101-122, 1989.
- ZHANG, P., SNOW, R. E. AND BOGAN, M. D. **A Investigation of Flotation Reagents** – Final Report of Florida Institute of Phosphate Research. 413 páginas, 2008.
- ZHOU, Z. A.; XU, Z.; FINCH, J.A. – **On the role of cavitation in particle collection during flotation – A critical review** – Mineral Engineering, Vol 7 No 9, pp. 1073-1084, 1994.