

ROGÉRIO CONTATO GUIMARÃES

**SEPARAÇÃO DE BARITA EM MINÉRIO
FOSFÁTICO ATRAVÉS DE FLOTAÇÃO EM COLUNA**

*Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de
São Paulo para obtenção do
título de Mestre em Engenharia.*

ARAXÁ
1995

ROGÉRIO CONTATO GUIMARÃES

**SEPARAÇÃO DE BARITA EM MINÉRIO
FOSFÁTICO ATRAVÉS DE FLOTAÇÃO EM COLUNA**

*Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de
São Paulo para obtenção do
título de Mestre em Engenharia.*

*Área de Concentração:
Engenharia Mineral*

*Orientador:
Antônio Eduardo Clark Peres*

ARAXÁ
1995

*"Há homens que lutam um dia e são bons
Há outros que lutam um ano e são
melhores.*

*Há outros que lutam muitos anos e são
muito bons.*

*Porém, há os que lutam toda a vida.
Estes são os imprescindíveis."*

*Bertold Brecht
1898-1956*

AGRADECIMENTOS

À Arafértil S/A. que, na pessoa de seu Diretor Superintendente Dr. Goodson Barbosa de Moura, soube entender que através da relação biunívoca Universidade - Empresa é construído um conhecimento sólido e continuado, contribuindo decisivamente para a modernização e expansão do parque industrial brasileiro.

Ao Prof. Dr. Eduardo Camilher Damasceno, pelo idealismo e perseverança com que dirigiu o Projeto Araxá.

Aos colegas e amigos da Arafértil: Lauro Akira Takata, Oscar Guillermo Ordoñez Carrasco, Reinaldo Gonçalves Resende, Carlos Armênio Cruz, Sebastião Hipólito de Almeida Teixeira e Darci Marinho Faria, que muito contribuíram com seus valiosos conhecimentos, discussões e orientações.

Ao Eng. Maurílio Dias Fernandes (CDTN-CNEN) pelo apoio na área de programas computacionais.

Em especial ao Prof. Dr. Antônio Eduardo Clark Peres que, através de seus conhecimentos teóricos e práticos e de sua dedicação e competência como orientador, soube traduzir em realidade este trabalho.

S U M Á R I O

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE ABREVIATURAS

LISTA DE SÍMBOLOS

RESUMO

"ABSTRACT"

1	INTRODUÇÃO	1
2	HISTÓRICO DA ARAFÉRTIL	4
3	CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS E MINERALÓGICAS DA MINERALIZAÇÃO APATÍTICA DE ARAXÁ	7
4	DESCRIÇÃO DO PROCESSO DE LAVRA E BENEFICIAMENTO DO MINÉRIO FOSFÁTICO DA ARAFÉRTIL	16
5	REVISÃO DA LITERATURA	28
5.1	Mineralogia e geologia da barita	28
5.2	Aplicações da barita	31
5.3	A técnica de flotação como etapa concentradora de minerais	37
5.3.1	Histórico da flotação	40
5.3.2	Máquinas de flotação	46
5.3.3	Coluna de flotação	66
5.3.3.1	Histórico	67
5.3.3.2	Características de funcionamento	72

5.3.3.3	Vantagens operacionais e econômicas	101
5.4	Modelamento matemático de reatores químicos	105
5.4.1	Definição de velocidade de uma reação	108
5.4.2	Análise individual de reatores ideais	111
5.4.2.1	Reator descontínuo	111
5.4.2.2	Reator em regime tubular ("steady-state plug flow reactor")	113
5.4.2.3	Reator de mistura - CSTR ("constant flow stirred tank reactor")	116
5.4.2.4	Comparação entre os reatores	119
5.4.3	Escoamento não ideal	124
5.4.4	Seqüência para dimensionamento de um reator ...	126
5.5	Equações básicas para modelamento e dimensionamento de colunas de flotação	128
5.5.1	Zona de recuperação	129
5.5.2	Zona de limpeza	133
5.5.3	Limitações do modelo	134
6	DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL	135
6.1	Instalação piloto de flotação	135
6.1.1	Fluxograma da instalação	135
6.1.2	Critérios de dimensionamento da instalação	138
6.1.3	Características dos equipamentos e instrumentação	139
6.1.4	Custo da instalação	156
6.2	Ensaio de flotação em coluna em escala piloto ..	159
6.2.1	Ensaio para desenvolvimento de processo	159
6.2.2	Ensaio para dimensionamento	160
6.3	Amostras dos minérios utilizados	162

6.4	Reagentes utilizados	165
6.4.1	Características dos reagentes utilizados	165
6.4.2	Preparação de reagentes	166
6.5	Análises químicas	173
6.6	Equipamentos utilizados	173
7	APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	177
7.1	Ensaio com reagentes: coletor, espumante e modulador de pH	177
7.1.1	Ensaio de condicionamento	177
7.1.2	Influência da dosagem de espumante, coletor e modulador de pH	182
7.2	Influência das variáveis relacionadas com o equipamento	199
7.2.1	Velocidade do ar	194
7.2.2	Velocidade da água de chuveiro	195
7.2.3	Altura da camada de espuma	197
7.2.4	Porcentagem de sólidos	199
7.2.5	Taxa de alimentação	201
7.2.6	Altura da coluna	203
7.2.7	Ensaio cinéticos	207
7.3	Ensaio de longa duração na condição otimizada ...	209
7.4	Calibração da instalação piloto através de microcomputador	214
7.5	Dimensionamento da coluna de flotação para barita	214
7.5.1	Critérios de dimensionamento	214
7.5.2	Análise de sensibilidade de variáveis via simulação	216
7.5.3	Definição final do equipamento e instalação ...	218

7.6	Avaliação econômica do projeto	225
7.7	Instalação e pré-operação da unidade industrial .	240
7.8	Comparação entre os parâmetros operacionais projetados e os atuais em operação	243
8	CONSIDERAÇÕES FINAIS	252
9	CONCLUSÕES	255
10	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	260
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	262

APÊNDICE I	Planilhas de acompanhamento dos ensaios na unidade piloto de flotação em coluna	1
APÊNDICE II	Ensaio de condicionamento em escala de bancada	4
APÊNDICE III	Ensaio realizado na unidade piloto de flotação em coluna	6
APÊNDICE IV	Calibração da unidade piloto de flotação em coluna	17
APÊNDICE V	Simulações para dimensionamento da unidade industrial para flotação de barita em coluna	20

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 3.1	- COMPLEXO ALCALINO-CARBONATÍTICO DO BARREIRO - ARAXÁ - MG [5]	8
FIGURA 3.2	- PLANTA GEOLÓGICA SIMPLIFICA DA INTRUSÃO ALCALINA DE ARAXÁ - MG [6]	9
FIGURA 3.3	- PERFIL GEOLÓGICO DA JAZIDA	11
FIGURA 4.1	- FLUXOGRAMA DO BENEFICIAMENTO DO MINÉRIO FOSFÁTICO DA ARAFÉRTIL	18
FIGURA 4.2	- FLUXOGRAMA SIMPLIFICADO DA USINA DE BENEFICIAMENTO	20
FIGURA 4.3	- FLUXOGRAMA DO CIRCUITO ANTIGO DE FLOTAÇÃO DE BARITA	24
FIGURA 4.4	- FLUXOGRAMA DO CIRCUITO ATUAL DE FLOTAÇÃO DE BARITA	25
FIGURA 5.1	- FORMAS DOS CRISTAIS DE BARITA [17]	29
FIGURA 5.2	- ÁRVORE DE DERIVADOS DA BARITA [18]	32
FIGURA 5.3	- A PIRÂMIDE DA FLOTAÇÃO	46
FIGURA 5.4	- CLASSIFICAÇÃO DAS MÁQUINAS DE FLOTAÇÃO ...	48
FIGURA 5.5	- CÉLULA MECÂNICA DO TIPO "CELL-TO-CELL" MODELO DENVER SUB-A [29]	51
FIGURA 5.6	- GEOMETRIA DOS TANQUES DAS CÉLULAS "OPEN-FLOW" [29]	52
FIGURA 5.7	- DETALHES DOS ROTORES DAS CÉLULAS "OPEN-FLOW": AKER, BOOTH E DENVER D-R [29]	53
FIGURA 5.8	- DETALHES DOS ROTORES DAS CÉLULAS "OPEN-FLOW": AGITAIR, WEDAG E BCS [29]	54

FIGURA 5.9 - DETALHES DOS ROTORES DAS CÉLULAS "OPEN-FLOW": OK TYPE U, SALA E WEMCO [29]	55
FIGURA 5.10 - CÉLULA PNEUMÁTICA COM TELA [30]	57
FIGURA 5.11 - CÉLULA PNEUMÁTICA SEM TELA [30]	58
FIGURA 5.12 - SEPARADOR DE ESPUMAS [29]	60
FIGURA 5.13 - CÉLULA DVCRA [32]	62
FIGURA 5.14 - CÉLULA BAHR [32]	63
FIGURA 5.15 - CENTRIFLOAT [32]	64
FIGURA 5.16 - "AIR-SPARGED-HYDROCYCLONE" [32]	65
FIGURA 5.17 - COLUNA NORTON-LEEDS [29]	70
FIGURA 5.18 - COLUNA FLOTAIRE [29]	71
FIGURA 5.19 - COLUNA HYDROCHEN [32]	73
FIGURA 5.20 - "PACKED BED COLUMN" [32]	74
FIGURA 5.21 - CÉLULA JAMESON [41]	75
FIGURA 5.22 - ESQUEMA DA COLUNA DE FLOTAÇÃO	76
FIGURA 5.23 - INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE SUPERFICIAL DO AR [33]	81
FIGURA 5.24 - INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE ESPUMANTE NO DIÂMETRO DAS BOLHAS DE AR [33]	84
FIGURA 5.25 - EFEITO DO DIÂMETRO DAS PARTÍCULAS NA FLOTAÇÃO DE COBRE [46]	86
FIGURA 5.26 - DISTRIBUIDORES DA ÁGUA DE LAVAGEM	89
FIGURA 5.27 - CAPACIDADE DE CARREAMENTO EM FUNÇÃO DO PRODUTO DO TAMANHO DAS PARTÍCULAS E SUA DENSIDADE [33]	94
FIGURA 5.28 - CONCENTRAÇÃO DO TRAÇADOR EM FUNÇÃO DO TEMPO EM COLUNA INDUSTRIAL [33]	95
FIGURA 5.29 - AJUSTE DA DTR AO MODELO DE DISPERSÃO DE REATORES EM REGIME TUBULAR [33]	97

FIGURA 5.30 - CONTROLES PARA ESTABILIZAÇÃO DA FLOTAÇÃO EM COLUNA [33]	102
FIGURA 5.31 - ALTERNATIVAS DE CONTROLE PARA ESTABILIZAÇÃO DA FLOTAÇÃO EM COLUNA [33]	103
FIGURA 5.32 - BALANÇO DE MASSA NO REATOR TUBULAR [64] .	115
FIGURA 5.33 - BALANÇO DE MASSA NO REATOR DE MISTURA ...	117
FIGURA 5.34 - CURVAS DTR PARA O MODELO DE REATORES DE MISTURA EM SÉRIE [64]	123
FIGURA 5.35 - MODELOS DE ESCOAMENTO NÃO-IDEAL EM EQUIPAMENTOS DE PROCESSO [64]	125
FIGURA 5.36 - INFLUÊNCIA DA DISPERSÃO NA DISTRIBUIÇÃO DO TEMPO DE RESIDÊNCIA [64]	127
FIGURA 5.37 - EFEITO DOS PARÂMETROS DE DISPERSÃO EM FENÔMENOS DE CINÉTICA DE PRIMEIRA ORDEM [71]	131
FIGURA 6.1 - DIAGRAMA DE BLOCOS DA UNIDADE PILOTO DE FLOTAÇÃO EM COLUNA	136
FIGURA 6.2 - ESQUEMA DA COLUNA PILOTO DE FLOTAÇÃO DA ARAFÉRTIL	144
FIGURA 6.3 - SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO DA COLUNA PILOTO DE FLOTAÇÃO	146
FIGURA 6.4 - ESQUEMA DO "SPARGER" DA COMINCO	148
FIGURA 6.5 - SISTEMA DE AERAÇÃO DA COLUNA PILOTO DE FLOTAÇÃO	149
FIGURA 6.6 - SISTEMA DE LAVAGEM DO CONCENTRADO DA COLUNA PILOTO DE FLOTAÇÃO	150
FIGURA 6.7 - SISTEMA DE CONTROLE DE NÍVEL DA COLUNA PILOTO DE FLOTAÇÃO	152

FIGURA 6.8 - SISTEMA DE CONTROLE DA VAZÃO DE AR DO
AERADOR DA COLUNA PILOTO DE FLOTAÇÃO 153

FIGURA 6.9 - SISTEMA DE CONTROLE DA VAZÃO DE ÁGUA DO
AERADOR DA COLUNA PILOTO DE FLOTAÇÃO 154

FIGURA 6.10 - SISTEMA DE CONTROLE DA COLUNA PILOTO DE
FLOTAÇÃO 155

FIGURA 6.11 - ESQUEMA DE AMOSTRAGEM DO UD1 163

FIGURA 6.12 - INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DE PREPARAÇÃO
DO CESS NA RECUPERAÇÃO [103] 167

FIGURA 6.13 - INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DE PREPARAÇÃO
DO CESS NA SELETIVIDADE [103] 168

FIGURA 6.14 - INFLUÊNCIA DA CONCENTRAÇÃO DE PREPARAÇÃO
DO CESS NA RECUPERAÇÃO [103] 169

FIGURA 6.15 - INFLUÊNCIA DA CONCENTRAÇÃO DE PREPARAÇÃO
DO CESS NA SELETIVIDADE [103] 170

FIGURA 7.1 - INFLUÊNCIA DO TEMPO DE CONDICIONAMENTO DO
ESPUMANTE E DO COLETOR NA FLOTAÇÃO DE
BARITA (ESCALA DE BANCADA) 179

FIGURA 7.2 - INFLUÊNCIA DO TEMPO DE CONDICIONAMENTO DO
COLETOR NA FLOTAÇÃO DE BARITA (ESCALA DE
BANCADA 180

FIGURA 7.3 - INFLUÊNCIA DO TEMPO DE CONDICIONAMENTO DO
ESPUMANTE NA FLOTAÇÃO DE BARITA 182

FIGURA 7.4 - INFLUÊNCIA DO TEMPO DE CONDICIONAMENTO DO
COLETOR NA FLOTAÇÃO DE BARITA 183

FIGURA 7.5 - INFLUÊNCIA DA DOSAGEM DE ESPUMANTE E
COLETOR (RELAÇÃO FIXA) NA FLOTAÇÃO DE
BARITA 186

FIGURA 7.6 - INFLUÊNCIA DA DOSAGEM DE ESPUMANTE NA FLOTAÇÃO DE BARITA	188
FIGURA 7.7 - INFLUÊNCIA DA DOSAGEM DE COLETOR NA FLOTAÇÃO DE BARITA	189
FIGURA 7.8 - INFLUÊNCIA DO pH DE CONDICIONAMENTO NA FLOTAÇÃO DE BARITA	193
FIGURA 7.9 - INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DO AR NA FLOTAÇÃO DE BARITA	196
FIGURA 7.10 - INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DA ÁGUA DE CHUVEIRO NA FLOTAÇÃO DE BARIA	198
FIGURA 7.11 - INFLUÊNCIA DA ALTURA DA CAMADA DE ESPUMA NA FLOTAÇÃO DE BARITA	200
FIGURA 7.12 - INFLUÊNCIA DA PORCENTAGEM DE SÓLIDOS NA FLOTAÇÃO DE BARITA	202
FIGURA 7.13 - INFLUÊNCIA DA TAXA DE ALIMENTAÇÃO NA FLOTAÇÃO DE BARITA	204
FIGURA 7.14 - ESQUEMA DE VARIAÇÃO DA ALTURA DA ZONA DE RECUPERAÇÃO	205
FIGURA 7.15 - INFLUÊNCIA DA ALTURA DA ZONA DE RECUPERAÇÃO NA FLOTAÇÃO DE BARITA	206
FIGURA 7.16 - ENSAIOS CINÉTICOS DE FLOTAÇÃO DE BARITA NA UNIDADE PILOTO DE FLOTAÇÃO EM COLUNA .	208
FIGURA 7.17 - ETAPAS PARA DIMENSIONAMENTO DE UMA COLUNA DE FLOTAÇÃO	217
FIGURA 7.18 - EFEITO DA TAXA DE ALIMENTAÇÃO NO DESEMPENHO DA COLUNA INDUSTRIAL DE FLOTAÇÃO DE BARITA	220
FIGURA 7.19 - GEOMETRIA DA COLUNA INDUSTRIAL DE FLOTAÇÃO DE BARIA [110]	221

FIGURA 7.20 - SISTEMA DE AERAÇÃO DA COLUNA INDUSTRIAL DE FLOTAÇÃO DE BARITA [111], [112]	222
FIGURA 7.21 - SISTEMA DE LAVAGEM DA CAMADA DE ESPUMA DA COLUNA INDUSTRIAL DE FLOTAÇÃO DE BARITA .	223
FIGURA 7.22 - FLUXOGRAMA DA UNIDADE INDUSTRIAL DE FLOTAÇÃO DE BARITA EM COLUNA [110]	226
FIGURA 7.23 - INFLUÊNCIA DO VALOR DO INVESTIMENTO NA TAXA INTERNA DE RETORNO E NO TEMPO DE PAGAMENTO DO INVESTIMENTO ORÇADO	235
FIGURA 7.24 - INFLUÊNCIA DO RESULTADO ECONÔMICO NA TAXA INTERNA DE RETORNO E NO TEMPO DE PAGAMENTO DO INVESTIMENTO ORÇADO	236
FIGURA 7.25 - INFLUÊNCIA DO RESULTADO ECONÔMICO NA TAXA INTERNA DE RETORNO E NO TEMPO DE PAGAMENTO DO INVESTIMENTO REALIZADO	239

LISTA DE TABELAS

TABELA 3.1	- COMPOSIÇÃO MINERALÓGICA APROXIMADA DOS DIFERENTES TIPOS DE MINÉRIO [10]	13
TABELA 5.1	- CARACTERIZAÇÃO DO CONCENTRADO DE BARITA [19], [20]	35
TABELA 5.2	- ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DO CONCENTRADO DE BARITA [19]	36
TABELA 5.3	- TÉCNICAS DE CONCENTRAÇÃO DE MINERAIS [21]	38
TABELA 5.4	- EVENTOS HISTÓRICOS RELEVANTES NA FLOTAÇÃO [22], [23]	44
TABELA 5.5	- MATRIZ DO PROCESSO PARA COLUNA DE FLOTAÇÃO [33]	99
TABELA 5.6	- COMPARAÇÃO DA ÁREA SUPERFICIAL ESPECÍFICA ENTRE CÉLULAS MECÂNICAS E COLUNA DE FLOTAÇÃO [61]	106
TABELA 5.7	- RESUMO DAS EQUAÇÕES E GRÁFICOS DOS REATORES IDEAIS	121
TABELA 5.8	- RELAÇÃO DE VOLUMES ENTRE REATORES DE MISTURA E TUBULARES	122
TABELA 5.9	- RESUMO DAS EQUAÇÕES DO MODELAMENTO DA ZONA DE RECUPERAÇÃO [71], [82]	132
TABELA 6.1	- CUSTO DA UNIDADE PILOTO DE FLOTAÇÃO EM COLUNA	157
TABELA 6.2	- CRONOGRAMA DO PROJETO DA UNIDADE PILOTO DE FLOTAÇÃO EM COLUNA	158
TABELA 6.3	- PROGRAMA DE AMOSTRAGEM DOS ENSAIOS PILOTO DE FLOTAÇÃO EM COLUNA	161

TABELA 6.4	- CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E GRANULOMÉTRICA DA ALIMENTAÇÃO DA COLUNA	164
TABELA 6.5	- INFLUÊNCIA DO TEMPO DE PREPARAÇÃO DO CESS [103]	172
TABELA 7.1	- COMPARAÇÃO DO CONSUMO DE ESPUMANTE E COLETOR ENTRE A COLUNA PILOTO DE FLOTAÇÃO E O CIRCUITO INDUSTRIAL DE CÉLULAS MECÂNICAS	192
TABELA 7.2	- CONDIÇÕES OPERACIONAIS DO ENSAIO DE LONGA DURAÇÃO	210
TABELA 7.3	- BALANÇO METALÚRGICO DO ENSAIO DE LONGA DURAÇÃO	211
TABELA 7.4	- RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO DA COLUNA PILOTO DE FLOTAÇÃO	213
TABELA 7.5	- SIMULAÇÕES DA FLOTAÇÃO DE BARITA POR COMPUTADOR	219
TABELA 7.6	- DETALHAMENTO DO SISTEMA DE INSTRUMENTAÇÃO E CONTROLE UTILIZADO NA UNIDADE INDUSTRIAL DE FLOTAÇÃO DE BARITA EM COLUNA	224
TABELA 7.7	- COMPARAÇÃO ENTRE O INVESTIMENTO ORÇADO E O REALIZADO	227
TABELA 7.8	- REDUÇÃO DE CUSTOS COM A FLOTAÇÃO DE BARITA EM COLUNA	231
TABELA 7.9	- COMPARAÇÃO DO DESEMPENHO DA FLOTAÇÃO EM COLUNA ENTRE A UNIDADE PILOTO E A INDUSTRIAL	232
TABELA 7.10	- FLUXO DE CAIXA ORÇADO PARA O PROJETO DE FLOTAÇÃO DE BARITA EM COLUNA [117]	234

TABELA 7.11 - PROJEÇÃO DO FLUXO DE CAIXA PARA O PROJETO DE FLOTAÇÃO DE BARITA EM COLUNA	238
TABELA 7.12 - COMPARAÇÃO DO CONDICIONAMENTO DOS REAGENTES ENTRE A UNIDADE PILOTO E A INDUSTRIAL	245
TABELA 7.13 - COMPARAÇÃO DO CONSUMO DE REAGENTES ENTRE A UNIDADE PILOTO E A INDUSTRIAL	247
TABELA 7.14 - COMPARAÇÃO DAS CONDIÇÕES OPERACIONAIS DA COLUNA DE FLOTAÇÃO ENTRE A UNIDADE PILOTO E A INDUSTRIAL	248
TABELA 7.15 - COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS METALÚRGICOS ENTRE A UNIDADE PILOTO E A INDUSTRIAL ...	251

LISTA DE ABREVIATURAS

- . CAMIG - Companhia Agrícola de Minas Gerais
- . CESS - cetil-estearil sulfato de sódio
- . CFSTR - "constante flow stirred tank reactor"
- . cm - centímetro
- . cm² - centímetro quadrado
- . cm³ - centímetro cúbico
- . CNTP - condições normais de temperatura e pressão
(P=1 atm e T=0 °C)
- . COMIG - Companhia Mineradora de Minas Gerais
- . CSN - Companhia Siderúrgica Nacional
- . CVRD - Companhia Vale do Rio Doce
- . DNPM - Departamento Nacional da Produção Mineral
- . DTR - distribuição do tempo de residência
- . eq. - equação
- . FCA - concentrado apatítico fino
- . PFR - "plug flow reactor"
- . g - grama
- . GCA - concentrado apatítico grosso
- . h - hora
- . m - metro
- . m² - metro quadrado
- . MBR - Minerações Brasileiras Reunidas
- . min - minuto
- . t - tonelada
- . μ m - micrômetro

- . BM1 - bomba centrífuga vertical (fluxograma da unidade piloto de flotação)
- . TQ1 - tanque pulmão (fluxograma da unidade piloto de flotação em coluna)
- . BM2 - bomba centrífuga vertical (fluxograma da unidade piloto de flotação em coluna)
- . CN - condicionador
- . t/h - tonelada por hora
- . % - porcentagem
- . l - litro
- . rpm - rotações por minuto
- . Hp - "horse power"
- . UD1 - "underflow" da primeira deslamegem
- . °C - graus centígrados
- . m³ - metro cúbico
- . Nm³/h - normal metro cúbico por hora
- . kgf/cm² - kilograma força por centímetro quadrado
- . ml - mililitro

LISTA DE SÍMBOLOS

- . NaOH - hidróxido de sódio
- . BaCO₃ - carbonato de bário
- . BaSO₄ - sulfato de bário
- . BaS - sulfeto de bário
- . CO₂ - dióxido de carbono, gás carbônico
- . Na₂CO₃ - carbonato de sódio
- . Na₂S - sulfeto de sódio
- . H₂ - gás hidrogênio
- . H₂S - ácido sulfídrico
- . (NH₄)₂CO₃ - carbonato de amônio
- . (NH₄)₂S - sulfeto de amônio
- . HCl - ácido clorídrico
- . BaCl₂ - cloreto de bário
- . H₂SO₄ - ácido sulfúrico
- . Na₂SO₄ - sulfato de sódio
- . N - número de moles
- . V - volume reacional
- . i - índice que indica o componente em análise num fenômeno químico
- . r_i - taxa de transformação do componente i, velocidade de uma fenômeno químico
- . C - concentração de um componente químico
- . C_A - concentração do componente A num fenômeno químico
- . C_{A0} - concentração inicial do componente A num fenômeno químico

- . n - ordem de um fenômeno químico
- . k - constante cinética de proporcionalidade
- . t - tempo de residência
- . R - rendimento de um fenômeno químico
- . R_{00} - rendimento máximo de um fenômeno químico
- . \int - símbolo matemático que representa o operador integral
- . e - número de Neppler
- . F - fluxo de um componente num fenômeno químico, expresso em mols/tempo
- . τ - tempo médio de residência
- . Jg - velocidade superficial do ar na coluna de flotação, razão entre vazão de ar nas CNTP e área transversal da coluna de flotação
- . ϵ_g - "hold up" do gás, porcentagem volumétrica que o ar ocupa na zona de recuperação da coluna de flotação
- . Ca - capacidade de arraste
- . d_{80} - diâmetro, em m, que deixa passar 80% do concentrado
- . ρ_p - densidade da partícula
- . Nd - número de dispersão
- . Ep - coeficiente de dispersão axial dos sólidos
- . Ul - velocidade intersticial do líquido
- . Usp - velocidade terminal de sedimentação das partículas
- . Hc - altura da zona de coleta da coluna
- . dc - diâmetro da coluna
- . Jg - velocidade superficial do gás

- . a - coeficiente do número de dispersão
- . kc - constante cinética de flotação para determinado mineral
- . τ_p - tempo de residência médio das partículas
- . Qfw - vazão volumétrica de água
- . Qfs - vazão volumétrica de sólidos
- . Ac - área da seção transversal da coluna
- . Jb - "bias"
- . g - aceleração da gravidade
- . dp - diâmetro das partículas
- . ρ_s - densidade das partículas
- . ρ_{sl} - densidade da polpa
- . ϕ_s - fração volumétrica do sólido na polpa
- . μ_{sl} - viscosidade da polpa
- . Rep - número de Reynolds das partículas
- . Qf - vazão volumétrica de polpa
- . ρ_l - densidade do líquido
- . μ_l - viscosidade do líquido
- . Rc - recuperação na zona de limpeza
- . Rt - recuperação total do mineral
- . Rk - recuperação do mineral na zona de coleta
- . τ_l - tempo de residência médio do líquido
- . Jsl - velocidade superficial da polpa
- . US\$ - dólar americano
- . P₂O₅ - pentóxido de oxigênio
- . Cao - óxido de cálcio

RESUMO

A flotação em coluna tem sido amplamente aplicada como processo de concentração de minerais, em substituição à flotação em células mecânicas.

Para a obtenção de concentrado de apatita no circuito de flotação de grossos a partir do minério da Arafertil é necessária a flotação prévia da barita. Caso contrário não é atingida a especificação em P_2O_5 , ocorrendo a diluição do concentrado de apatita pela barita flotada.

Com o objetivo de avaliar técnico-economicamente a substituição das células de flotação mecânicas por colunas de flotação, foi montada uma unidade piloto de capacidade de 4000 kg/h de minério, com uma coluna de 24" (61 cm) de diâmetro.

Foram realizados ensaios para a avaliação das melhores condições de processo e levantamento dos parâmetros de dimensionamento. Os resultados obtidos justificaram economicamente o projeto da instalação industrial. A partir de simulações via computador foi realizado o dimensionamento da coluna industrial.

O desempenho da flotação em coluna industrial para barita confirmou os resultados previstos na escala piloto e simulados via computador.

ABSTRACT

Column flotation is being widely utilized in the concentration of minerals replacing mechanical cells.

The production of apatite concentrate in the coarse particles circuit from Arafertil's ore requires pre-flotation of barite, otherwise the specification grade of P_2O_5 is not reached, due to the dilution of the apatite concentrate by the floated barite.

Aiming at the technical and economical evaluation of replacing mechanical flotation cells by flotation columns, a pilot unit was built, yielding an ore throughput of 4000 kg/h, comprising a 24" (61cm) diameter column. Tests were performed to evaluate the best process conditions and to provide design parameters. The results indicated the economical feasibility of building an industrial plant. The industrial column was designed via computer aided simulations.

The barite flotation performance in the industrial column confirmed the results predicted in the pilot plant testwork and computer simulations.

1 INTRODUÇÃO

A Arafertil S/A foi constituída em 02 de abril de 1971, transformando-se num dos grandes passos do país em direção à auto-suficiência na produção de fertilizantes fosfatados, já que na época a grande maioria do fostatato consumido era importado.

O minério lavrado atualmente pela Arafertil corresponde ao minério tipicamente oxidado com teores de barita na faixa de 7% a 12% na pilha homogeneizada, conforme é mostrado no capítulo 2. A barita constitui-se num contaminante de grande importância no processo de beneficiamento para a concentração de apatita, já que pode diluir consideravelmente o concentrado apatítico.

A Arafertil possui minério oxidado suficiente para aproximadamente 10 anos de operação, contudo com grande interferência de regiões onde ocorre transição com o minério micáceo e o minério sílico-carbonático.

A presença de barita é uma das principais diferenças do minério da Arafertil frente aos demais minérios fosfáticos. O controle deste contaminante no processo de beneficiamento pode ser feito através de duas opções:

- . depressão juntamente com os outros minerais de ganga,
- . flotação prévia.

A flotação prévia de barita (antecedendo a de apatita) no circuito de grossos é necessária, devido ao fato de sua

depressão não ser satisfatória. Este fato ocorre porque a barita possui grande flotabilidade com ácidos graxos (coletor de apatita).

A flotação de barita está presente no circuito da Usina de Beneficiamento da Arafertil desde o início de sua operação. Contudo, com o advento da tecnologia de flotação em coluna, passou-se a avaliar a substituição do circuito convencional de flotação de barita por coluna de flotação.

Com o sucesso da implantação de colunas de flotação nos circuitos de flotação de finos gerados e finos naturais, o estudo do circuito de flotação de grossos (barita e apatita) passou a ser considerado como uma boa perspectiva de melhoria técnico-econômica do processo de beneficiamento.

Dentro deste panorama, um extenso trabalho de avaliação da flotação de barita tornou-se necessário com os seguintes propósitos, que constituem os objetivos desta dissertação:

- . montagem de uma instalação piloto de flotação em coluna que atendesse o desenvolvimento de processo e dimensionamento de instalações industriais,
- . avaliação do desempenho da flotação de barita em coluna de flotação comparativamente à flotação em células convencionais, através de ensaios piloto de flotação realizados "on line" com a Usina de Beneficiamento,
- . dimensionamento de uma coluna de flotação industrial para flotação de barita no circuito de grossos, utilizando-se os resultados obtidos nos ensaios piloto de flotação em coluna no modelo de dimensionamento proposto

por Yianatos, Espinosa-Gomez, Finch, Laplante e Dobby [1], via simulação por microcomputador, . verificação dos parâmetros operacionais e resultados metalúrgicos obtidos na instalação industrial, comparativamente aos previstos no projeto.

Os ensaios foram realizados nas instalações de laboratório e unidade piloto da Arafertil S.A. em Araxá, MG.

2 HISTÓRICO DA ARAFÉRTIL

Desde a sua fundação em 1971 a Araféertil possuiu a participação do governo federal como acionista através da Petroféertil. A partir de abril de 1994, com a sua privatização, a Araféertil S/A conta com a participação acionária dos seguintes grupos industriais: Bunge & Born (50%) e Ipiranga (50%).

A formação da empresa foi resultado de um conjunto de trabalhos, realizados por técnicos brasileiros, visando o aproveitamento industrial das reservas de apatita do Barreiro de Araxá, das quais os primeiros estudos petrográficos foram realizados por Djalma Guimarães em 1925, quando identificou a presença de apatita e barita. Esses trabalhos foram intensificados principalmente a partir de 1965, com uma intensa campanha de sondagem executada pela GEOSOL para o DNPM [2].

Os primeiros resultados positivos, indicando a viabilidade do aproveitamento econômico da apatita de Araxá, foram obtidos no final da década de 60. Nessa época a Companhia Agrícola de Minas Gerais - Camig, hoje Companhia Mineradora de Minas Gerais - Comig, já extraía o minério, produzindo fosfato natural (Fosfato de Araxá).

O contrato de arrendamento da jazida da Comig para a Araféertil foi celebrado em 1972 e averbado no DNPM em 1973. Após a comprovação dos resultados preliminares em escala piloto, investiram-se US\$ 1,5 milhões na construção de uma unidade semi-industrial, com capacidade de produção de

10.000 t/ano de concentrado apatítico, tendo sido estabelecidos os seguintes objetivos [3]:

- . aperfeiçoamento do processo de concentração, através de análise do comportamento do minério nas diversas etapas do beneficiamento,
- . fornecimento de subsídios para a execução do projeto da unidade industrial de beneficiamento,
- . obtenção de amostras de concentrado visando realizar testes para o seu aproveitamento na fabricação de fertilizantes fosfatados,
- . treinamento do corpo técnico da empresa.

A operação da usina industrial iniciou-se em setembro de 1977, entrando em sua fase operacional, propriamente dita, em agosto de 1978, com sua inauguração oficial.

Em 1981 entraram em operação as unidades químicas, primeiramente a unidade de acidulação e granulação em prato para produção de fertilizantes fosfatados parcialmente solúveis, chamado de FAPS (Fosfato Arafértil Parcialmente Solúvel) seguidas, no mesmo ano, pela unidade de acidulação para produção de SSP (superfosfato simples) e unidade de granulação em tambor.

A Arafértil, atualmente, tem a seguinte capacidade de produção:

- . 200.000 t/ano de brita fosfática para a produção de fosfato natural pela Comig,

- . 50.000 t/ano de brita fosfática para a produção de termofosfato pela Mitsui,
- . 800.000 t/ano de concentrado apatítico,
- . 450.000 t/ano de fertilizantes fosfatados na forma de pó,
- . 300.000 t/ano de fertilizantes fosfatados na forma granulada.

3 CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS E MINERALÓGICAS DA MINERALIZAÇÃO APATÍTICA DE ARAXÁ

O Complexo Carbonatítico do Barreiro situa-se no Estado de Minas Gerais, na zona Alto Paranaíba, no município de Araxá, 6 Km a sul do centro urbano. Suas coordenadas geográficas são: 19°38' de latitude sul e 46°56' de longitude oeste [4].

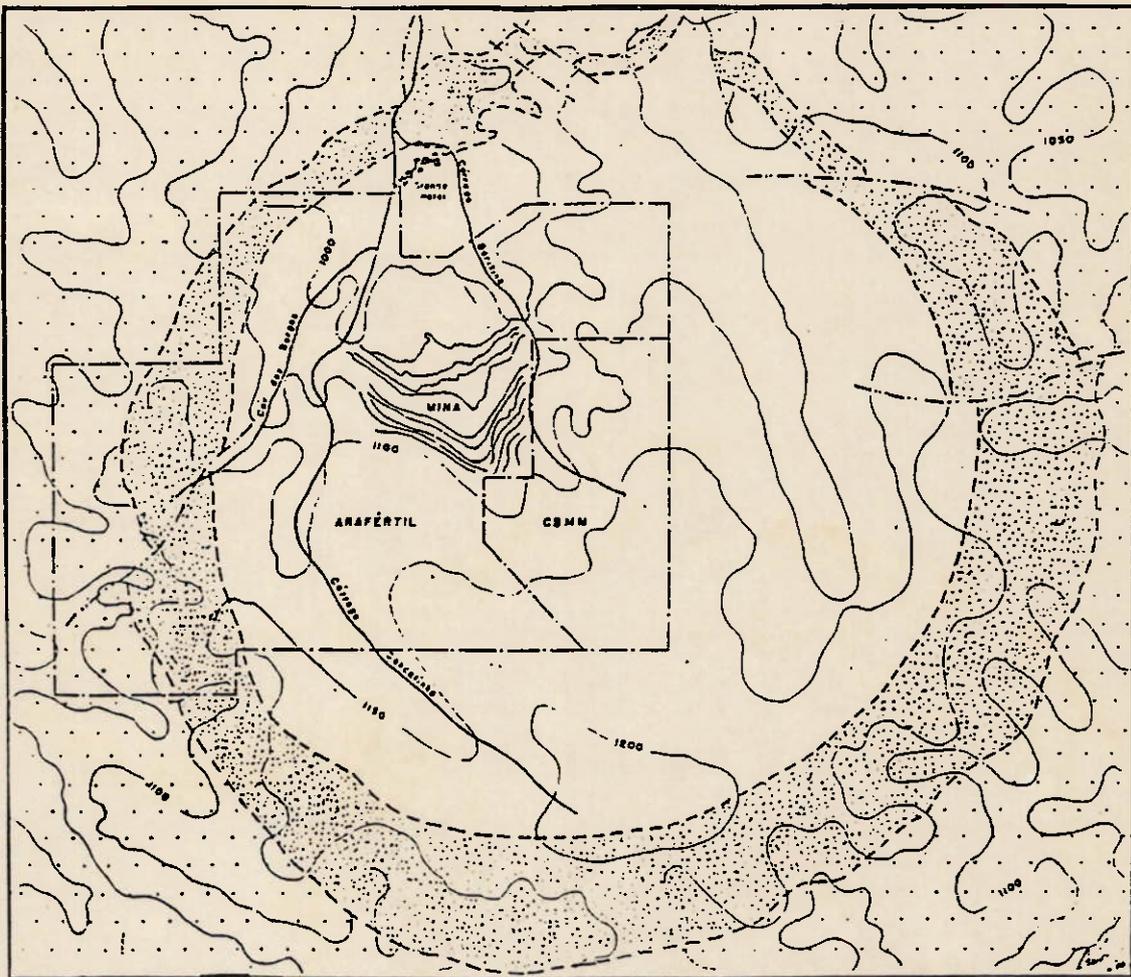
O complexo carbonatítico do Barreiro tem forma aproximadamente circular com 4,5 km de diâmetro, ocupando uma área em torno de 16 km². O maciço é constituído principalmente por rochas carbonatíticas e glimeríticas conforme apresentado na figura 3.1 [5].

A intrusão das rochas alcalino-carbonatíticas resultou no arqueamento dômico das rochas encaixantes, com formação de fraturas radiais e concêntricas [6].

As observações a seguir se referem especificamente à concessão da Arafértil, que representa cerca de 20% da área total do complexo. Esta concessão situa-se na porção NW do complexo conforme figura 3.2.

Sob efeito do intemperismo no glimerito, de composição essencialmente micácea, houve alteração parcial em vermiculita, transformação de outros silicatos em minerais do grupo da clorita, alteração dos minerais de ferro e transformação de parte da apatita em fosfatos hidratados amorfos [7],[8].

No carbonatito, houve, além dos fenômenos anteriores, lixiviação do carbonato e reprecipitação dos íons de ferro,

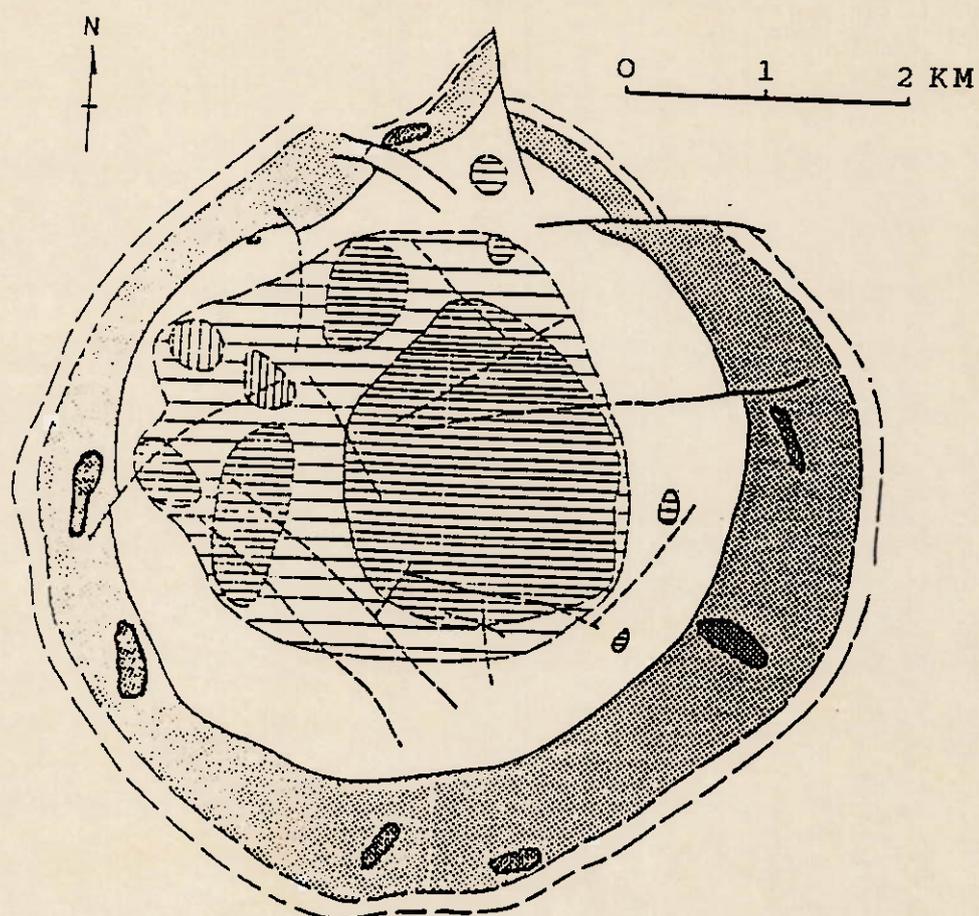


MICA-XISTOS

ANEL QUARTIZÍTICO

INTRUSÃO ALCALINO
CARBONATÍTICA

FIGURA 3.1 - COMPLEXO ALCALINO-CARBONATÍTICO DO BARREIRO -
ARAXÁ - MG [5]



-  SILEXITO
-  SOVITO
-  BEFORSITO COM GLIMERITO SUBORDINADO
-  BEFORSITO/GLIMERITO
-  GLIMERITO COM BEFORSITO SUBORDINADO
-  XISTOS FENITIZADOS
-  QUARTIZITOS FENITIZADOS
-  FALHA
-  FALHA INDEFINIDA

FIGURA 3.2 - PLANTA GEOLÓGICA SIMPLIFICADA DA INTRUSÃO
ALCALINA - ARAXÁ - MG [6]

bário, fosfato e silício, sendo que a concentração econômica está relacionada a esses fenômenos.

A jazida de fosfato mostra um perfil geológico que, simplifiadamente apresentado na figura 3.3, pode ser assim dividido [2], [9]:

- . capeamento estéril,
- . minério,
- . rocha matriz.

O capeamento estéril e o minério correspondem ao manto de intemperismo.

CAPEAMENTO ESTÉRIL

No capeamento estéril encontram-se reunidos dois materiais distintos que praticamente não apresentam apatita, apesar de conterem fósforo. Este fato é facilmente identificado em análises químicas, onde ocorre virtual ausência de CaO e presença de P_2O_5 . A cobertura superficial corresponde a uma camada de cor avermelhada escura com espessura máxima na ordem de 20 metros, com granulação muito fina, apresentando principalmente óxidos hidratados de ferro e argilo-minerais, podendo ainda conter crostas e blocos de limonita dispersos ou concentrados. Segue o material estéril em apatita, resultante do intemperismo extremo dos constituintes originais, onde ocorreu a lixiviação dos carbonatos e remoção quase integral de cálcio e magnésio. Possui cor marrom amarelada e em grande parte apresenta granulometria extremamente fina, predominantemente abaixo

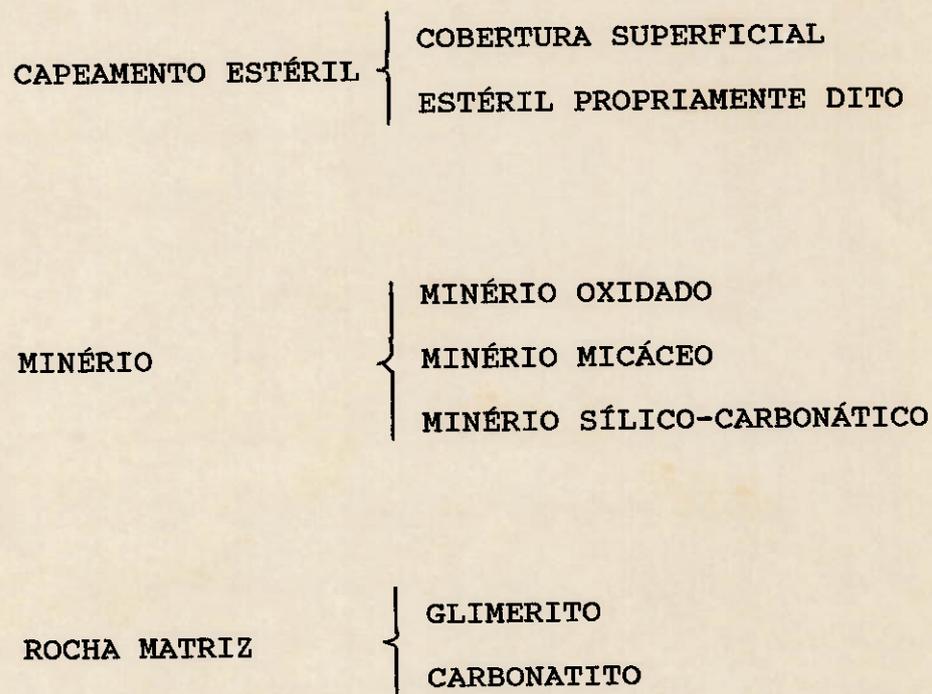


FIGURA 3.3 - PERFIL GEOLÓGICO DA JAZIDA

de 400 mesh (0,037 mm). A espessura pode variar bastante, sendo em alguns pontos praticamente reduzida, podendo chegar até a 60 metros.

Os minerais mais frequentes são óxidos hidratados de ferro, quartzo, argilo-minerais, magnetita, hematita, brookita e anatásio, barita, pandaíta, além dos fosfatos representados principalmente por gorceixita, rabdofanita e alguma goiazita.

MINÉRIO

Imediatamente abaixo do capeamento estéril encontra-se a zona portadora de apatita, na qual podem ser identificados diversos tipos de minérios, em função de características mineralógicas ou granulométricas relevantes no processo de beneficiamento.

É possível identificar diferentes grupos de minérios, tais como:

- . minério oxidado,
- . minério micáceo,
- . minério sílico-carbonático.

A composição mineralógica aproximada destes grupos de minério é apresentada na tabela 3.1.

O minério oxidado pode ser dividido em 2 grupos: minério argiloso com material cimentado subordinado e minério cimentado com material argiloso subordinado. O minério mais argiloso é caracterizado pela inconsistência e baixa coesão, apresentando teores de P_2O_5 apatítico em torno de

TABELA 3.1 - COMPOSIÇÃO MINERALÓGICA APROXIMADA DOS
DIFERENTES TIPOS DE MINÉRIO [10]

MINERAIS	TIPOS DE MINÉRIOS		
	OXIDADO	MICÁCEO	SÍLICO-CARBON.
APATITA	32,5	24,3	26,6
BARITA	7,1	0,2	2,3
CARBONATOS	2,9	3,0	18,7
ÓXIDOS DE FERRO	27,4	21,5	15,6
MINERAIS SIL.-MAG.	10,0	37,3	26,2
OUTROS MINERAIS	20,1	13,7	10,6
TOTAL	100,0	100,0	100,0

10%, podendo este valor ser mais elevado quando ocorre a presença de material cimentado. O minério cimentado é caracterizado por se apresentar mais duro e coeso, com teores de P_2O_5 apatítico acima de 15%, podendo este valor ser menor quando ocorre a presença de material argiloso rico em fosfatos não apatíticos, característico do capeamento estéril [11]. O minério cimentado apresenta-se bastante recortado por veios de barita.

No minério micáceo é observada a presença de vermiculita associada a hidrobiotita e clorita. Devido ao intemperismo, o minério micáceo é encontrado em gradações diferenciadas de coloração, passando de descoloridas a marrom esverdeada e verde escura. Os teores de MgO no minério variam desde a faixa de 2,5% até valores de 5%, podendo chegar na faixa de 10-15%, ocorrendo conseqüentemente uma diluição dos teores de P_2O_5 apatítico, situando-se na faixa de 10%. Este minério apresenta menor quantidade de barita, variando de traços a 3-4%.

O minério sílico-carbonático apresenta composição mineralógica semelhante ao minério micáceo no que diz respeito ao conteúdo de apatita, ressaltando a diferença básica devido à presença de carbonatos calcíticos e dolomíticos com diversos graus de intemperismo [12]. Este minério, tal como o minério micáceo, apresenta baixos teores de barita, variando de traços a 2-3%.

ROCHA MATRIZ

A rocha matriz é constituída de material de composição litológica bastante irregular, com teores de P_2O_5 apatítico

situando-se entre 4 e 6%. A rocha matriz pode ser dividida em 2 tipos principais:

- . glimerito,
- . carbonatito.

O glimerito é uma denominação genérica dada a rocha de granulação fina a grossa, que apresenta essencialmente minerais micáceos de coloração amarronzada. Encontram-se porcentagens variáveis de carbonatos calcíticos e dolomíticos, podendo ocorrer filossilicatos esverdeados como acessórios.

O carbonatito corresponde a uma rocha de coloração esbranquiçada a amarelada. Apresenta granulometria fina, geralmente carbonato dolomítico, a granulometria grosseira, geralmente composição de carbonatos calcítico e dolomítico. Apresenta como acessórios: apatita, magnetita, pirocloro, micas, olivinas e outros silicatos magnesianos.

4 DESCRIÇÃO DO PROCESSO DE LAVRA E BENEFICIAMENTO DO MINÉRIO FOSFÁTICO DA ARAFÉRTIL

A produção anual da mina corresponde a 4,0 milhões de toneladas de minério e 2,5 a 3,0 milhões de toneladas de estéril. A lavra é feita em bancadas de 10 m de altura, utilizando-se tratores de esteira para desmonte, devido à baixa consistência do minério. A utilização de explosivos é restrita a áreas de materiais mais consistentes. Para o carregamento são utilizadas carregadeiras frontais sobre pneus, enquanto que o transporte é realizado por caminhões de 30 toneladas de capacidade.

O beneficiamento do minério é realizado seguindo as etapas:

- . unidade de britagem: . britagem primária,
 - . produção de fosfatos bitolados e
 - . pilha de homogeneização.
- . usina de concentração: . moagem primária,
 - . separação magnética de baixo campo,
 - . moagem secundária/classificação,
 - . deslamagem,
 - . flotação de apatita fina,
 - . flotação de barita,
 - . flotação de apatita grossa,
 - . remoagem,
 - . flotação de apatita remoída,
 - . separação magnética (alto campo),

- . filtragem,
- . secagem.

O fluxograma do beneficiamento do minério fosfático é mostrado na figura 4.1.

Na unidade de britagem o minério é classificado, britado e homogeneizado, de onde é retomado para a usina de concentração. Na usina de concentração o minério é submetido a operações de: moagem, classificação, separação magnética de baixo campo, deslamagem e flotações de barita e de apatita. O concentrado da flotação de apatita é encaminhado para separação magnética de alta intensidade, filtragem e secagem.

A seguir serão feitos comentários sobre o circuito de beneficiamento do minério.

BRITAGEM PRIMÁRIA

O minério proveniente da mina ou do estoque é alimentado à instalação de britagem primária, através de uma moega com alimentador de placas, sendo conduzido a uma grelha vibratória, com abertura de 4" (10,16 cm). A fração compacta do minério retida nessa grelha é alimentada a um britador de mandíbulas (FAÇO 150120) que reduz os blocos a partículas com diâmetro máximo de 10" (25,4 cm) [13]. O passante na grelha se junta com o produto do britador de mandíbulas. Esses produtos são transportados, através de correias transportadoras, às instalações de britagem secundária.

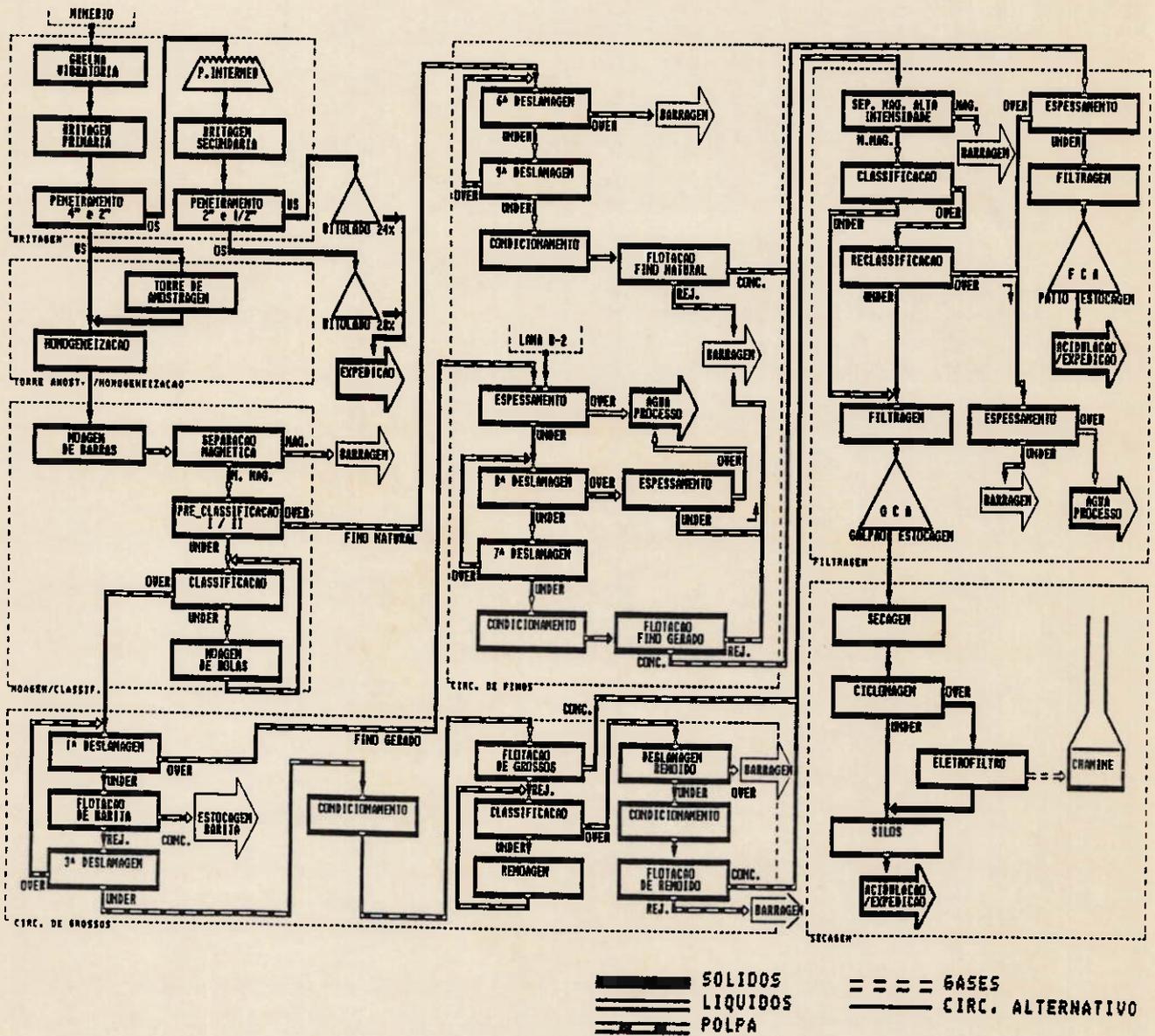


FIGURA 4.1 - FLUXOGRAMA DO BENEFICIAMENTO DO MINÉRIO FOSFÁTICO DA ARAFÉRTIL

BRITAGEM SECUNDÁRIA

Na britagem secundária, o minério é peneirado na malha 2" (5,08 cm) por 2 peneiras vibratórias paralelas, sendo que o passante nessa malha, após passar pela Torre de Amostragem, tem como destino as pilhas de homogeneização. A fração retida em 2" (5,08 cm) é encaminhada a uma pilha intermediária, de onde é retomada, britada num britador de impactos (HAZEMAG D44) e peneirada numa peneira vibratória de 2" (5,08 cm) e 1/2" (1,27 cm). O produto maior que 2" (5,08 cm) é denominado bitolado 28, devido ao fato de possuir 28% de P_2O_5 , sendo enviado para a MITSUI, via COMIG, para a produção de termofosfato. O produto intermediário é denominado bitolado 24, devido ao fato de possuir 24% de P_2O_5 , sendo enviado para a COMIG para a produção de fosfato natural.

PILHA DE HOMOGENEIZAÇÃO

As pilhas de homogeneização, confeccionadas por empilhadeira automática, estão localizadas numa área com capacidade para estocagem de 84.000 t de minério, com umidade média de 18%.

MOAGEM PRIMÁRIA

O minério homogeneizado, através do retomador (Villares) com capacidade de 540 t/h, é enviado por correias transportadoras para a usina de concentração. A capacidade de processamento da usina é de 480-500 t/h, dependendo da dureza do minério esta alimentação pode cair para 400 t/h. A figura 4.2 apresenta o fluxograma simplificado da Usina

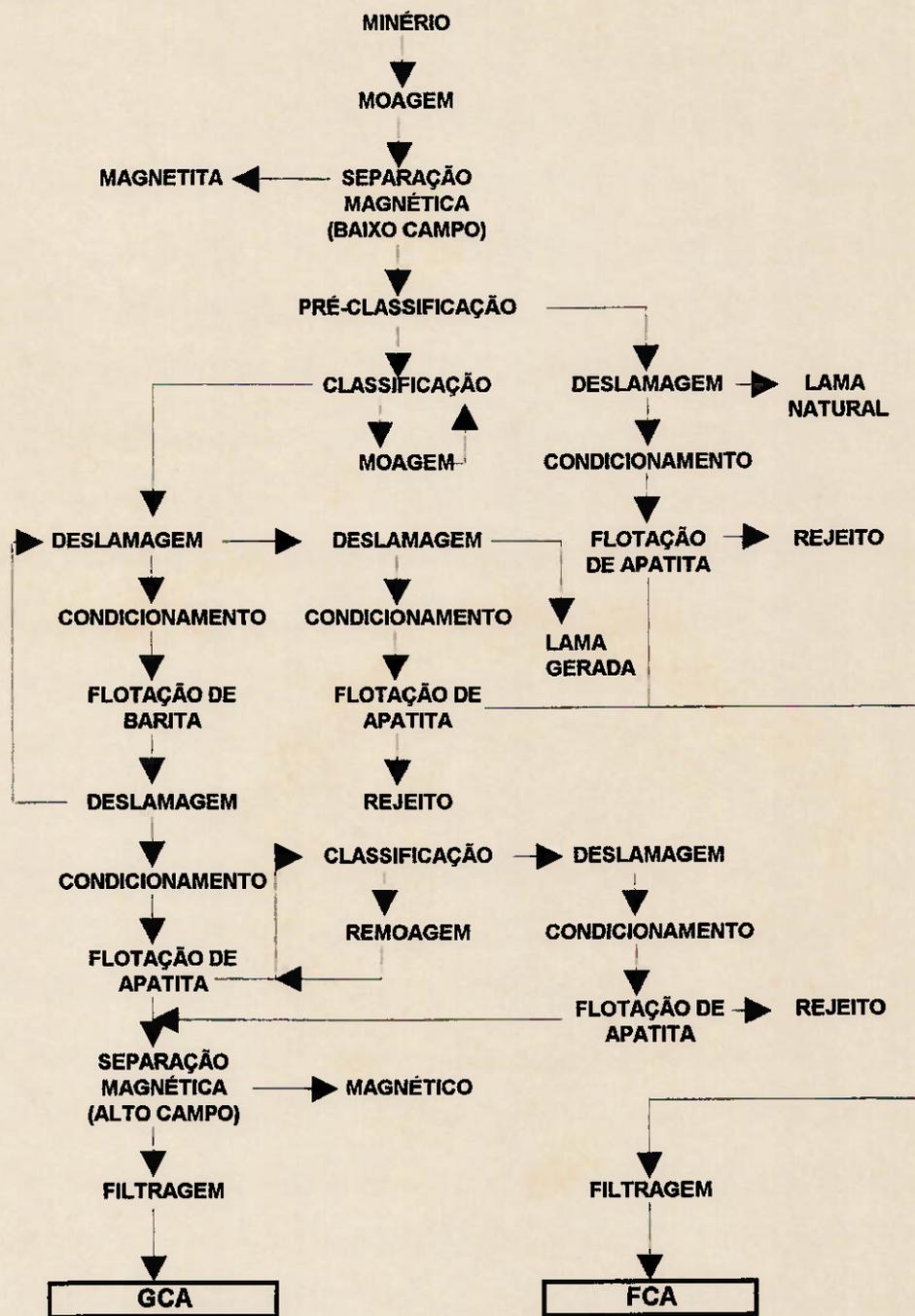


FIGURA 4.2 - FLUXOGRAMA SIMPLIFICADO DA USINA DE BENEFICIAMENTO

de Concentração. A moagem primária do minério é efetuada num circuito constituído de um moinho de barras de 11' x 16' (335 cm x 488 cm), fabricado pela ALLIS CHALMERS, operando em circuito aberto.

SEPARAÇÃO MAGNÉTICA DE BAIXO CAMPO

O produto da moagem de barras segue para a separação magnética de baixo campo a úmido (SALA INTERNATIONAL - 916 mm x 1800 mm). A intensidade do campo é de 800-900 Gauss. O produto magnético, constituído essencialmente de magnetita, é descartado e o não-magnético segue no circuito para a pré-classificação.

CLASSIFICAÇÃO E MOAGEM SECUNDÁRIA

O produto não-magnético, antes de ser cominuído em moinho de bolas, é pré-classificado em duas baterias de hidrociclones de 26" (66 cm) em circuito contracorrente. O "underflow" desse circuito é destinado à moagem secundária em um moinho de bolas de 12,5' x 17' (381 cm x 518 cm), fabricado pela ALLIS CHALMERS, operando em circuito fechado com quatro hidrociclones classificadores de diâmetro de 24" (61 cm). O "underflow" da classificação retorna ao moinho, enquanto o "overflow" vai para a deslamagem. Nesta etapa de tratamento, o processo é todo realizado com adição de água.

DESLAMAGEM

A primeira deslamagem consta de 5 hidrociclones de 20" (50,8 cm), tendo como alimentação o "overflow" da classificação do moinho de bolas. O "underflow" segue para

a flotação de barita grossa e o "overflow", juntamente com a lama de uma antiga barragem de deposição de finos, vai para 2 estágios de deslamagem em série e contracorrente, em ciclones de 40 mm, chamadas de oitava (4 baterias) e sétima (3 baterias) deslamagem. O "overflow" da oitava deslamagem é espessado para recuperação de água; o "underflow" vai para a sétima deslamagem. O "overflow" da sétima deslamagem volta em circuito fechado para a oitava deslamagem e o "underflow" vai para o circuito de flotação de apatita de finos, chamado de flotação de finos gerados.

O "overflow" da pré-classificação vai para 2 estágios de deslamagem em série e contracorrente, em ciclones de 40 mm, chamadas de sexta (7 baterias) e nona deslamagem (2 baterias). O "overflow" da sexta deslamagem é descartado para a barragem e o "underflow" alimenta a nona deslamagem. O "overflow" da nona deslamagem volta em circuito fechado para a sexta deslamagem e o "underflow" vai para o circuito de flotação de apatita fina, chamado de flotação de finos naturais [14].

FLOTAÇÃO DE APATITA FINA

A flotação de apatita fina consta de dois circuitos: flotação de finos naturais e de finos gerados. Os dois circuitos são bastante semelhantes, constituindo-se de condicionamento de depressor (amido não convencional de milho), condicionamento de coletor (sabão de óleo de arroz) e flotação em coluna (3,0 m x 4,5 m x 14,5 m) em um único estágio, obtendo-se concentrado final, chamado de FCA e rejeito final. A flotação é realizada na faixa de pH

entre 11,8 e 12,2.

FLOTAÇÃO DE BARITA

O "underflow" da primeira deslamagem é condicionado com os reagentes: espumante e coletor em pH em torno de 9,5.

A flotação de barita era realizada em células mecânicas em 2 estágios ("rougher" e "scavenger"). O estágio "rougher" era constituído de 2 células Wemco de 300 ft³ (8,5 m³), enquanto o "scavenger" de 3 células Wemco de 300 ft³ (8,5 m³). Atualmente a flotação de barita é realizada em um único estágio em coluna de flotação (3,0 m x 4,5 m x 14,5 m), implantado no início de 1994. Os reagentes utilizados na flotação de barita são: espumante (Flotanol D14 - Hoechst) e coletor (cetil estearil sulfato de sódio - CESS - Flotiner S72 - Hoechst) [15]. Os estudos da flotação de barita em coluna de flotação correspondem ao assunto desta dissertação [16].

O fluxograma do circuito antigo e do circuito atual são mostrados respectivamente nas figuras 4.3 e 4.4.

FLOTAÇÃO DE APATITA GROSSA

O produto não flotado da flotação de barita vai para uma deslamagem em hidrociclonagem de 20" (50,8 cm). O "underflow" desta deslamagem segue para um condicionador de 10' x 10' (305 cm x 305 cm), onde são adicionados o depressor (amido de milho não convencional) e NaOH como modulador de pH. O pH de operação situa-se em 11,5.

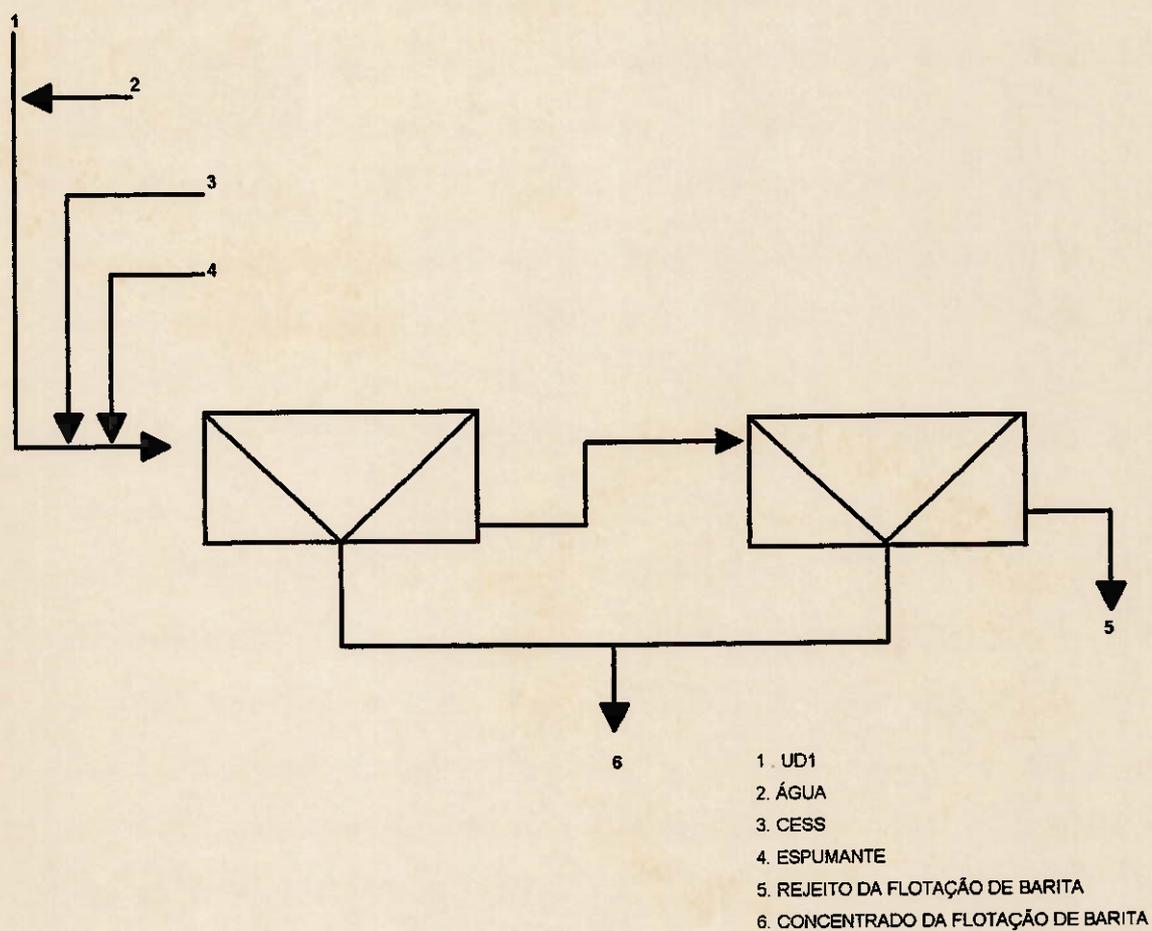


FIGURA 4.3 - FLUXOGRAMA DO CIRCUITO ANTIGO DE FLOTAÇÃO DE BARITA

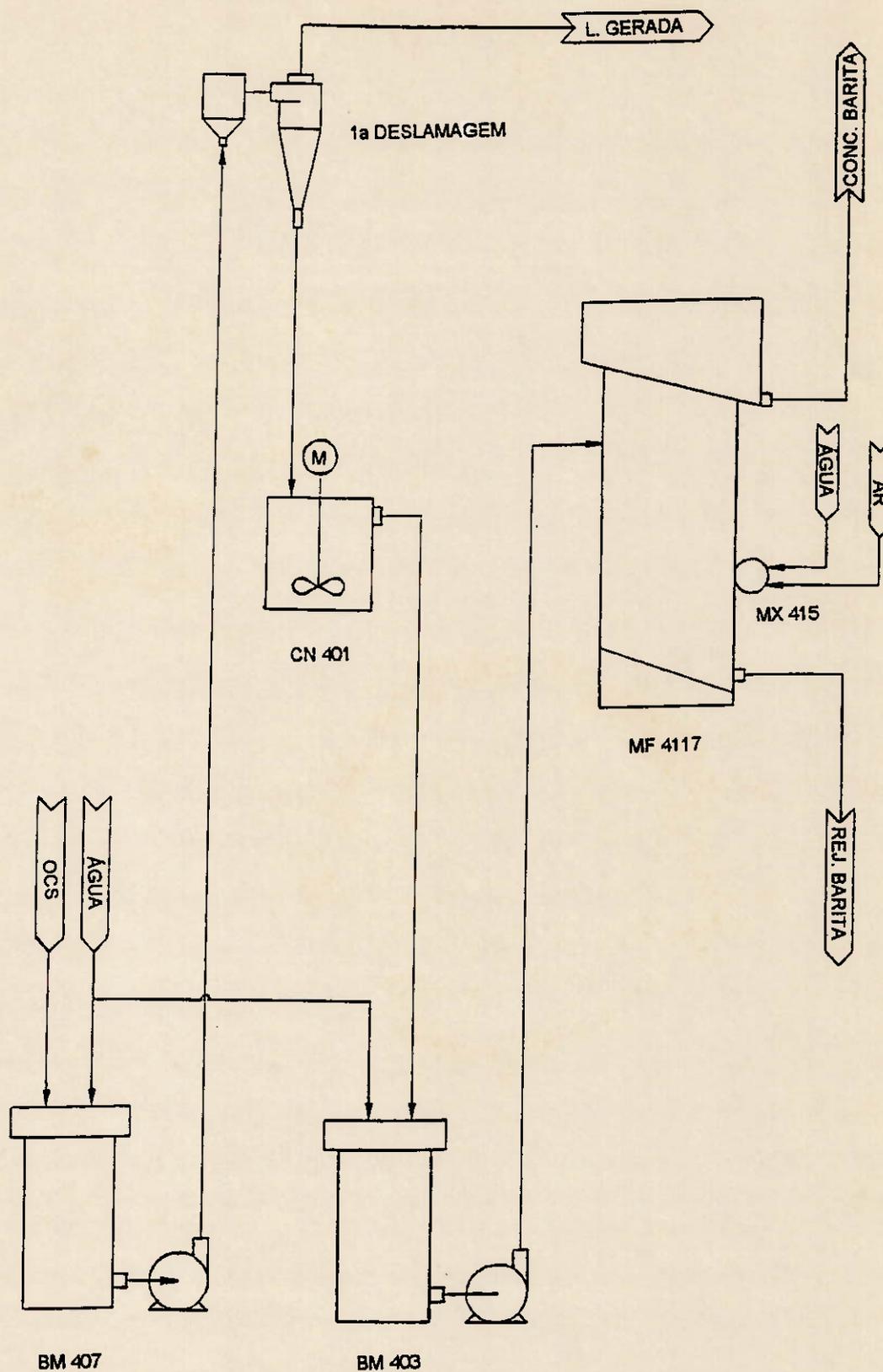


FIGURA 4.4 - FLUXOGRAMA DO CIRCUITO ATUAL DE FLOTAÇÃO DE BARITA

Em seguida a polpa segue para um condicionador retangular (3,5 m x 3,5 m x 2,5 m) com quatro compartimentos, onde é adicionado o coletor: sabão de óleo de arroz pré-saponificado. Após ajuste de porcentagem de sólidos, tem-se a etapa de flotação (2 estágios paralelos em colunas de 3,0 m x 4,5 m x 14,5 m). O concentrado das duas colunas de flotação vai para a separação magnética de alto campo e o rejeito para o circuito de remoagem.

REMOAGEM

O rejeito da flotação de apatita segue para um circuito de remoagem e classificação. É utilizado um moinho de 10' x 13' (305 cm x 396 cm), tendo "cylpebs" como corpo moedor, em circuito fechado com uma bateria de quatro ciclones de 20" (50,8 cm). O "overflow" da classificação vai para uma etapa de deslamagem em hidrociclones de 10".

FLOTAÇÃO DE APATITA REMOÍDA

O "underflow" da deslamagem segue para um condicionador de 10' x 10' (305 cm x 305 cm), onde são adicionados o depressor (amido de milho não convencional) e NaOH como modulador de pH. O pH de operação situa-se em 11,6. Em seguida a polpa segue para um condicionador retangular (3,5 m x 3,5 m x 2,5 m) com quatro compartimentos, onde é adicionado o coletor: sabão de óleo de arroz. Após ajuste de porcentagem de sólidos, tem-se a etapa de flotação, a qual é constituída de um estágio em coluna (3,0 m x 4,5 m x 14,5 m). O concentrado vai para a separação magnética de alto campo, juntamente com o concentrado da flotação de

apatita grossa, enquanto o rejeito vai para a barragem de deposição de rejeitos.

SEPARAÇÃO MAGNÉTICA DE ALTO CAMPO

Os concentrados da flotação de apatita grossa e de apatita remoída passam por uma separação magnética de alta intensidade, 16000 Gauss (TBM - BOXMAG HIW4), visando a remoção seletiva dos principais minerais contaminantes, que são óxidos hidratados de ferro (limonita e goethita), não seletivos na flotação.

FILTRAGEM

O produto não magnético da separação magnética em alto campo, após desagramento em hidrociclones, é filtrado em um filtro plano DORR-OLIVER.

O concentrado das flotações de finos alimenta um, eventualmente dois, filtros de tambor com descarga "belt", após espessamento e recuperação de água.

SECAGEM

O concentrado de apatita desmagnetizado, chamado GCA, com 36,0 % de P_2O_5 e 3,0 % de Fe_2O_3 , vai para um galpão de homogeneização, podendo a seguir alimentar um secador "flash-dryer".

O concentrado de apatita fina, chamado FCA, com 35,0 % de P_2O_5 e 5,5 % de Fe_2O_3 não passa por processo de secagem, sendo principalmente utilizado na fabricação de fertilizantes na própria Arafertil, ou em parte vendido, com 16% de umidade.

5 REVISÃO DA LITERATURA

5.1 Mineralogia e geologia da barita

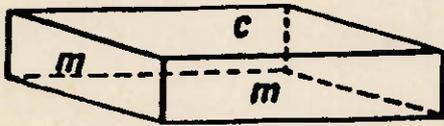
Mineralogicamente a barita se apresenta sob a forma de cristais orto-rómbicos e bi-piramidais, normalmente tabulares, paralelos à base. Muitas vezes os cristais se apresentam sob a forma de losangos [17]. As formas dos cristais de barita são mostradas na figura 5.1.

A sua coloração é bastante variada, podendo se apresentar com cor branca leitosa opaca, azulada, rósea ou esverdeada. Na mina do Barreiro a barita está associada à rocha fosfática, apresentando-se com estrutura cristalina bem definida, ou de aspecto sacaroidal, variando de tonalidade desde o branco opaco ao esverdeado, sendo esta última mais comum.

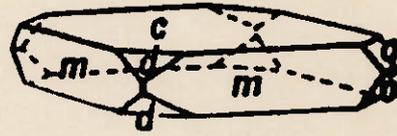
As ligações entre oxigênio e enxofre são mais fortes que as ligações do bário com o sulfato, influenciando na forma dos cristais.

A barita pura, correspondendo ao sulfato de bário - $BaSO_4$, apresenta 65,7% de BaO e 34,3% de SO_3 . O estrôncio pode substituir o bário, podendo chegar até a celestita, sulfato de estrôncio - $SrSO_4$. A densidade da barita pura é 4,5; dureza na escala de Mohs está entre 3,0 e 3,5 e fusibilidade igual a 4, produzindo chama verde-amarelada característica do bário.

A barita é um mineral comum, ocorrendo na crosta terrestre sob as mais diversas formas e aspectos. Pode ser



PRISMA VERTICAL



VÉRTICES BISELADOS

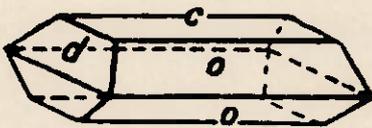
PRISMA RETANGULAR
ALONGADO PARALELAMENTE
AO EIXO aPRISMA RETANGULAR
ALONGADO PARALELAMENTE
AO EIXO b

FIGURA 5.1 - FORMA DOS CRISTAIS DE BARITA [17]

apresentada sob a forma de veios ou nódulos, geralmente de origem epitermal, teletermal ou hidrotermal; ocorre também por substituição ou em depósitos residuais ou por sedimentação.

A reserva do Barreiro apresenta altos teores de barita. O material terroso oxidado é portador de nódulos duros que ocorrem até a rocha fresca. A morfologia da barita do Barreiro apresenta certas semelhanças com as reservas do Nevada e Arkansas, importantes jazidas dos EUA de origem supostamente sedimentar.

Os principais depósitos de barita no Brasil encontram-se no estado da Bahia, podendo ressaltar as minas de Ilha Pequena e Ilha Grande, no município de Camamu, a mina de Altamira, na localidade de Itapura, município de Miguel Calmon e a mina do município de Ibitiara. A Bahia apresenta outras ocorrências nos seguintes municípios: Irecê, Oliveira dos Brejinhos, Barra de Estiva, Contendas do Sincorá, Itupiara, Macaúbas, Paramirim, Rio do Pires, Ibiajara, Itubera, Itambé, Botuporã e Seabra. Há ainda de se notar um certo número de ocorrências nos estados do Rio Grande do Norte, na região de Ceridó, Ceará, Paraíba, Piauí, Maranhão, Pará, Goiás, Paraná e Minas Gerais, onde a mina do Barreiro apresenta uma reserva significativa de barita. Algumas apresentam exploração precária por garimpagem, enquanto muitas não apresentam importância econômica [18].

As principais ocorrências mundiais estão nos EUA, um dos maiores produtores mundiais, Canadá, México, Peru, Grécia, França, Alemanha, Espanha, Irlanda, Romênia, Itália e Rússia.

5.2 Aplicações da barita

As principais utilizações da barita, mostradas na figura 5.2, podem ser divididas em 3 áreas:

- . lama de perfuração de poços de petróleo,
- . fabricação de sais de bário,
- . outras aplicações.

A lama de perfuração de poços de petróleo é constituída basicamente de bentonita, barrilha, cloreto de sódio, taninos, carboximetil-celulose, dextrina e outros. As principais funções da lama são: manter as partículas do material perfurado em suspensão; resfriar o material de perfuração; manter a estabilidade da parede do poço e evitar o aparecimento de água artesianas, gás ou mesmo petróleo quando a pressão interna do horizonte produtivo é menor que a pressão hidrostática do líquido de perfuração. A barita por ser um mineral de baixa abrasividade, isento de substâncias tóxicas e de alta densidade, é utilizada na lama com a função de dar densidade à lama, impedindo que a pressão dos gases nos poços a traga de volta para cima. O emprego da barita com densidade abaixo da exigida (4,2) dificulta o escoamento da lama pela diminuição da viscosidade, causando o aumento da temperatura no interior do poço.

Dentre os sais de bário, o de maior expressão econômica é o carbonato, seguido do cloreto e do sulfato precipitado ("blanc fixe"). A fabricação de sais de bário consiste na

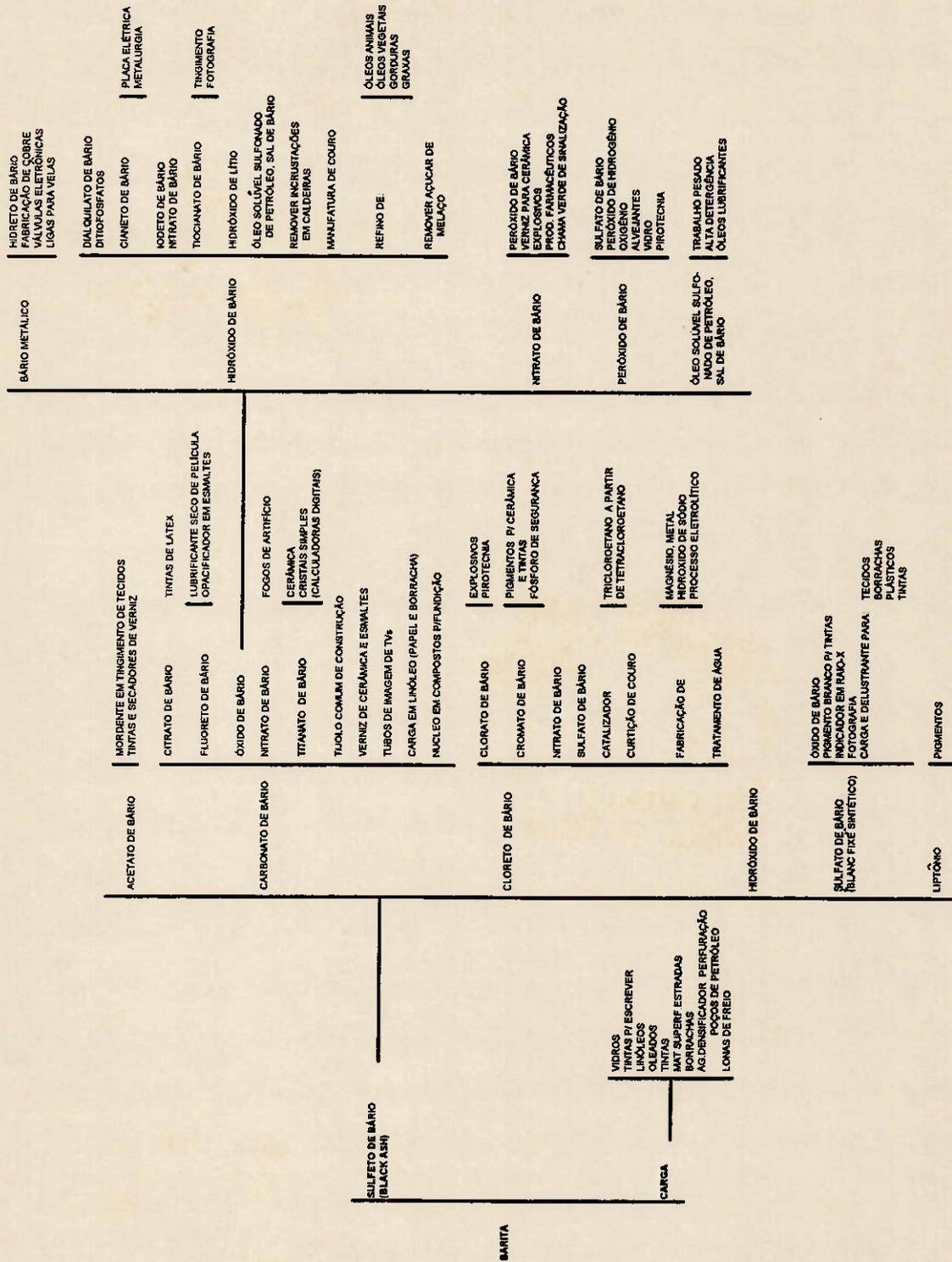


FIGURA 5.2 - ÁRVORE DE DERIVADOS DA BARITA [18]

obtenção de um sal solúvel que permita a preparação dos demais sais. As fontes naturais de bário são a barita, a qual ocorre em larga escala, e a witherita (carbonato de bário - BaCO_3), cuja principal reserva se encontrava na Inglaterra, que deixou de produzir a partir de 1970. Basicamente o processo de obtenção de sais de bário a partir da barita consiste em reduzir a barita a sulfeto de bário com carvão em forno rotativo. O sulfeto de bário, chamado "black-ash", é extraído por lixiviação e em seqüência são produzidos os outros sais de bário. A reação básica é mostrada a seguir:



A partir do sulfeto de bário é possível produzir carbonato de bário, cloreto de bário e sulfato de bário precipitado. As principais reações são:

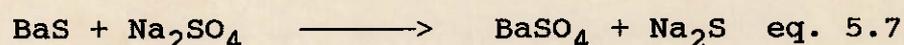
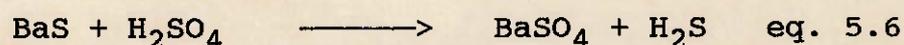
Carbonato de bário



Cloreto de bário



Sulfato de bário precipitado



O carbonato de bário é utilizado na fabricação de cinescópio, componente de televisores coloridos e preto e branco, na indústria cerâmica como matéria prima para a fabricação do esmalte, na fabricação de tijolos, cerâmica vermelha, setor de vidros, setor de ferritas, fabricação de sabões, etc.

O cloreto de bário possui consumo mais restrito que o carbonato de bário, sendo utilizado no tratamento térmico de metais; álcalis sódicos e outros de menor importância econômica.

As outras aplicações da barita são: material de carga (devido ao fato de sua extrema alvura, é aplicada na fabricação de tintas, borrachas, plásticos, produtos de couro, cola e papel), na indústria farmacêutica como elemento de contraste nas radiografias, lonas de freios, indústria de vidros, etc.

Existem outros compostos de bário de consumo com menor importância, tais como: hidróxido de bário, titanato de bário e sulfeto de bário.

A barita apresenta inúmeras aplicações na indústria, sendo bastante diversificada a sua utilização.

A caracterização da barita obtida pelo processo de flotação na unidade de beneficiamento se encontra nas tabelas 5.1 e 5.2.

TABELA 5.1 - CARACTERIZAÇÃO DO CONCENTRADO DE BARITA
[19],[20]

ITENS	UNIDADE	VALORES
TEORES	%	
BaSO ₄		87,4
P ₂ O ₅		3,9
CaO		4,5
Fe ₂ O ₃		2,6
Al ₂ O ₃		0,7
ÂNGULO DE REPOUSO	o	32
DENSIDADE	g/cm ³	
REAL		3,9
APARENTE		2,1

NOTA: ANÁLISES REALIZADAS NOS LABORATÓRIOS DA
ARAFÉRTIL

TABELA 5.2 - ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DO CONCENTRADO DE
BARITA [19]

MALHA TYLER (#)	ABERTURA (mm)	RETIDO (%)	
		SIMPLES	ACUMULADO
+65	0,210	0,73	0,73
+100	0,144	5,33	6,06
+150	0,105	16,06	22,11
+200	0,074	24,31	46,42
+270	0,053	21,13	67,55
+325	0,044	10,06	77,61
+400	0,037	6,81	84,42
-400	<0,037	15,58	100,00
TOTAL		100,00	-

NOTA: ANÁLISES REALIZADAS NO LABORATÓRIO DA
ARAFÉRTIL

5.3 A técnica de flotação como etapa concentradora de minerais

A tecnologia mineral pode ser conceituada de forma ampla como o conjunto de atividades que possuem como matéria-prima principal o minério.

A tecnologia mineral possui vários setores, que vão desde o reconhecimento geológico e pesquisa mineral, até a área de transporte e comercialização, passando pela mineração, lavra, tratamento de minérios, hidrometalurgia, pirometalurgia, etc.

O tratamento de minérios apresenta as etapas de preparação, concentração, acabamento do concentrado e descarte do rejeito. A etapa de concentração corresponde à separação entre os minerais úteis e os minerais de ganga, a qual depende basicamente de 3 itens:

- . liberação das espécies minerais,
- . existência de propriedade diferenciadora, seja ela natural ou induzida,
- . separabilidade dinâmica, correspondendo à característica necessária ao equipamento no qual está ocorrendo a concentração do mineral.

Dos processos de concentração, citados na tabela 5.3, os mais antigos são aqueles que utilizam as propriedades óticas como propriedade diferenciadora, destacando a catação. Atualmente existem equipamentos modernos que substituem os sentidos humanos empregando células

TABELA 5.3 - TÉCNICAS DE CONCENTRAÇÃO DE MINERAIS [21]

PROPRIEDADES	MÉTODOS
ÓPTICAS	ESCOLHA ÓPTICA (MANUAL OU AUTOMÁTICA)
DENSIDADE	MEIO DENSO, JIGUES, MESAS, ESPIRAIS, CONES, CICLONES, BATEIAS, CICLONES DE MEIO DENSO, ETC.
FORMA	IDEM DENSIDADE
SUSCEPTIBILIDADE MAGNÉTICA	SEPARAÇÃO MAGNÉTICA
CONDUTIVIDADE ELÉTRICA	SEPARAÇÃO ELETROSTÁTICA
RADIOATIVIDADE	ESCOLHA COM CONTADOR
TEXTURA-FRIABILIDADE	COMINUIÇÃO, CLASSIFICAÇÃO, HIDROSSEPARAÇÃO, PENEIRAMENTO
REATIVIDADE QUÍMICA	HIDROMETALURGIA
REATIVIDADE DE SUPERFÍCIE	FLOTAÇÃO, AGREGAÇÃO OU DISPERSÃO SELETIVA, ELETROFORESE, AGLOMERAÇÃO ESFÉRICA

fotoelétricas, fluorescência induzida, etc.

Existe uma gama muito grande de propriedades que podem ser exploradas como diferenciadoras na concentração dos minerais, tais como [21]: densidade, forma, susceptibilidade magnética, condutividade elétrica, radioatividade, textura-friabilidade, reatividade química, reatividade de superfície, etc.

A reatividade de superfície tem se tornado a principal propriedade diferenciadora aplicada na concentração de minerais. Dentre os métodos baseados na reatividade de superfície destacam-se:

- . floculação seletiva, aplicada a partículas finas, sendo hoje restrita basicamente a alguns minérios de ferro, devido à dificuldade de escolha de reagentes,
- . eletroforese, aplicada na indústria química na separação de partículas muito finas com cargas de superfície diferentes, através do movimento destas em campo elétrico,
- . aglomeração esférica, especialmente desenvolvida para a concentração de carvão com elevado teor de cinzas, através da adição de óleo para a formação de agregados,
- . flotação, em crescente desenvolvimento com a implementação de novas técnicas e equipamentos, apresentando grande importância econômica.

A técnica de flotação, especialmente a flotação em coluna, tem apresentado grande impulso tecnológico na última década, sendo amplamente discutida nos próximos capítulos.

5.3.1 Histórico da flotação

A história do desenvolvimento da flotação acompanha os três principais métodos de concentração:

- . flotação em óleo, "bulk oil flotation",
- . flotação pelicular, "skin flotation",
- . flotação por espuma, "froth flotation".

A flotação em óleo utiliza o fato de alguns minerais apresentarem afinidade natural por óleo em presença de água, passando conseqüentemente da interface óleo-água para a fase oleosa, enquanto os minerais de ganga, que são molhados pela água, encaminham-se para a fase aquosa. A fase oleosa flutua, devido à sua menor densidade, enquanto a fase aquosa, com os minerais de ganga, afunda. Este processo requer uma grande quantidade de óleo, podendo chegar a uma parte de óleo para cada parte de minério, em massa. O método de flotação em óleo teve praticamente somente um representante industrial, que foi o processo desenvolvido e patenteado por Elmore em 1898 [22], sendo basicamente constituído de um tambor rotativo ajustado a um tanque. Este processo foi utilizado em algumas localidades da Inglaterra e Austrália, sendo rapidamente deixado de lado e substituído. Elmo desenvolveu modificações e aperfeiçoamento de seu método, contudo sofreu a concorrência com a flotação pelicular e posteriormente a flotação por espuma.

A flotação pelicular baseia-se no fato de alguns minerais apresentarem características hidrofóbicas, ou seja, serem naturalmente repelentes à água. Estes minerais podem ser mantidos em suspensão por mecanismo de tensão superficial, descrito mais a frente. O método consiste basicamente em fazer com que o minério seco finamente moído seja cuidadosamente colocado em contato com água. As partículas flutuadas são descarregadas na parte superior, enquanto os minerais de ganga afundam no tanque sendo em seguida também descarregados. Em outros casos torna-se necessária a utilização de óleos para formarem uma película que promova o efeito de hidrofobicidade nas partículas minerais. Este processo emprega pequenas quantidades de óleo comparativamente ao processo da flotação em óleo, geralmente de 1-2 kg de óleo por tonelada de minério a ser tratado. Este processo foi desenvolvido entre 1890 e 1915. O primeiro processo industrial foi o de De Basais, o qual foi instalado com relativo sucesso em Broken Hills, Austrália, em 1905 [22].

Os dois métodos citados anteriormente, flotação em óleo e flotação pelicular, não são seletivos quanto a espécies de minerais, pois a separação ocorre devido à propriedade de hidrofobicidade natural ou forçada, sem poder ser controlada especificamente para uma espécie mineral. Este fato tornou estas técnicas aplicáveis geralmente quando o minério continha somente uma espécie com a característica desejada. Estes dois processos tornaram-se obsoletos tendo-se em vista o desenvolvimento da flotação por espuma.

O terceiro método, a flotação por espuma, baseia-se na adesão do mineral a uma bolha gasosa, geralmente ar. Do mesmo modo que nas técnicas anteriores, ocorre portanto a necessidade de tornar-se seletivamente hidrofóbicas as partículas minerais. Os mecanismos que são envolvidos na flotação por espuma correspondem a uma profundidade maior do que é aqui colocado, sendo este tópico detalhado nos capítulos posteriores. O início da flotação por espuma foi no princípio do século XX, em 1901, com Charles Potter na Austrália e em 1902, com Alcides Froment na Itália, que independentemente verificaram que a presença de bolhas de gás poderia ser um agente ideal para flotar as partículas hidrofóbicas [22], [23]. A geração de bolhas poderia vir de uma reação química; tal como a experiência de Potter que gerou bolhas de gás pela adição de ácido sulfúrico ao minério, gerando H_2S pela reação com sulfetos ou CO_2 pela reação com carbonatos; bem como a experiência de Froment, também pela geração de CO_2 pela reação de ácido sulfúrico com carbonatos. Devido ao fato de redução significativa da quantidade de óleo, a substituição deste por outros reagentes químicos capazes de apresentar seletividade frente aos minerais ao tornarem-os hidrofóbicos e a possibilidade de geração de bolhas de ar por vácuo ou pela aeração forçada fizeram com que a flotação por espuma logo se apresentasse de grande potencial, passando a substituir as flotações em massa de óleo e pelicular.

Desde então o processo de flotação por espuma foi passando por constantes desenvolvimentos, sendo utilizados novos reagentes, equipamentos e condições operacionais, os quais

o fizeram ser hoje um dos mais importantes processos de concentração mineral, tendo a sua aplicação praticamente extensiva a todos os minerais, dependendo do desenvolvimento de reagentes e condições operacionais adequadas.

A tabela 5.4 mostra cronologicamente os eventos da flotação desde os seus primórdios.

Devido à substituição praticamente completa da flotação em massa de óleo e pelicular pela flotação por espuma, é comum usarmos simplesmente o termo flotação quando nos referimos a esta última, que será adotado neste trabalho a partir de então.

O processo de flotação pode ser avaliado como um sistema iterativo de três grandes componentes [24]:

- . físico-química,
- . operação,
- . equipamento.

Os aspectos físicos-químicos enfocam os reagentes coletores, depressores, espumantes, ativadores, pH e aditivos de flotação de uma forma geral, procurando estabelecer os seus mecanismos de atuação [25], [26].

Sob o ponto de vista da operação, são consideradas as variáveis tais como: porcentagem de sólidos, taxa de alimentação, distribuição granulométrica, mineralogia, grau de liberação, temperatura, bem como a filosofia de trabalho dos operadores e disponibilidade da instalação.

Os componentes ligados ao equipamento correspondem

**TABELA 5.4 - EVENTOS HISTÓRICOS RELEVANTES NA
FLOTAÇÃO [22], [23]**

ANO	PESSOA(S)/PAÍS(ES)	DESENVOLVIMENTO
1860	Hayness/Inglaterra	flotação em óleo, avaliação das diferenças de flotabilidade de minerais
1898	Elmore/Inglaterra	primeiro processo industrial de flotação em óleo (País de Gales)
1901-2	Potter/Austrália Froment/Itália	flotação por espuma com pouco óleo, espuma gerada por acidulação (carbonato)
1905	De Bavais/Austrália	primeiro processo industrial de flotação pelicular em Broken Hills (Austrália)
1910	Houwer/Inglaterra	criação da máquina de flotação por espuma com agitação mecânica e aspiração de ar
1929	Guadin/EUA	controle do pH na flotação por espuma
1910-30	vários	desenvolvimento de diversos reagentes coletores, espumantes e aditivos
1961	R. Tremblay/Canadá P. Boutin	desenvolvimento da coluna de flotação
1980-...	Canadá, Austrália, África do Sul, América do Sul	aplicação da coluna de flotação em escala industrial e aplicação de modelamento matemático

principalmente ao tipo de máquina de flotação, agitação, aeração, configuração do circuito e seu controle.

Os dois primeiros aspectos têm apresentado significativo desenvolvimento nas últimas décadas sendo, cada vez mais, desenvolvidos reagentes específicos para cada tipo de minério, bem como técnicas que permitem avaliar e propor mecanismo para a sua atuação. Contudo, uma grande mudança de enfoque no equipamento, influenciando também na operação, vem acontecendo desde o final da década passada, quando a coluna de flotação passou a ter expressão em suas aplicações industriais.

Dentro desta base, mostrada na figura 5.3, físico-química, operação e equipamento, que conduzem ao processo de flotação, dar-se-á ênfase ao item equipamento, mais especificamente à coluna de flotação.

5.3.2 Máquinas de flotação

A importância da flotação como processo de concentração de minerais tem provocado o desenvolvimento e aprimoramento das máquinas de flotação. Existe uma diversidade muito grande de aplicações em minérios de granulometrias, teores e condições operacionais bastante diferentes. Este fato faz com que sejam avaliadas as principais características de cada tipo de máquinas de flotação para a escolha correta. Em alguns casos a escolha adequada do equipamento pode mudar significativamente o fluxograma do circuito e mesmo as condições operacionais e dosagem de reagentes, tornando o processo com melhor rendimento, mais seletivo ou de menor

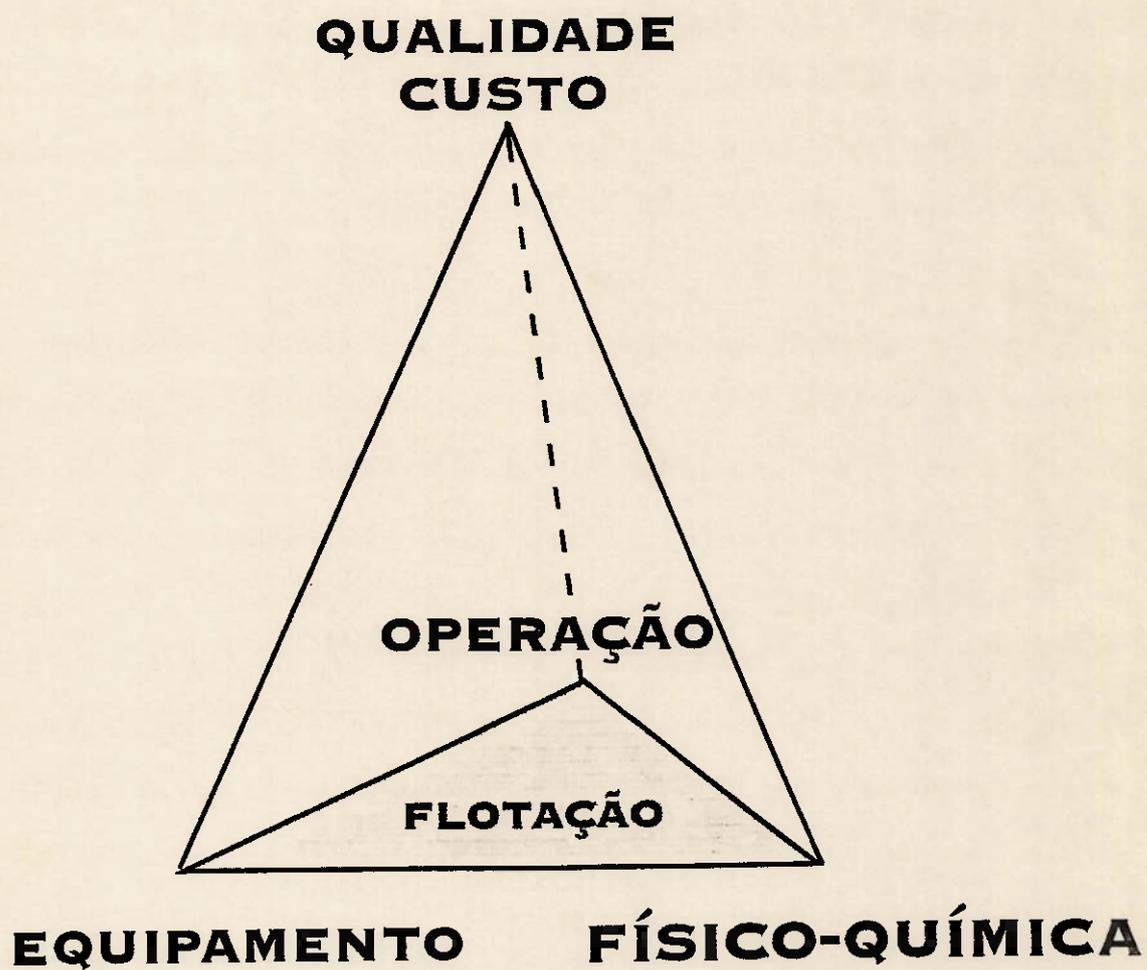


FIGURA 5.3 - A PIRÂMIDE DA FLOTAÇÃO

custo. Por outro lado, a escolha incorreta da máquina de flotação pode inviabilizar um processo.

Conforme Peres [27], as máquinas de flotação são equipamentos que devem executar várias funções simultaneamente, tais como [28]:

- . manter a suspensão da polpa sem aterramento das partículas, o que poderia provocar um descontrole e baixo rendimento do equipamento,
- . possuir sistemas de aeração da polpa,
- . promover a coleta seletiva do mineral de interesse através do contato partícula-bolha, bem como fazer com que as partículas coletadas caminhem para a camada de espuma,
- . evitar excesso de turbulência da polpa próximo à camada de espuma,
- . boas condições de transporte da polpa, seja a alimentação, o concentrado ou o rejeito,
- . controlar o nível da interface polpa-espuma.

As máquinas de flotação podem ser divididas em três classes principais:

- . células mecânicas,
- . células pneumáticas exclusive coluna,
- . coluna de flotação.

A figura 5.4 mostra os principais exemplos das três classes citadas.

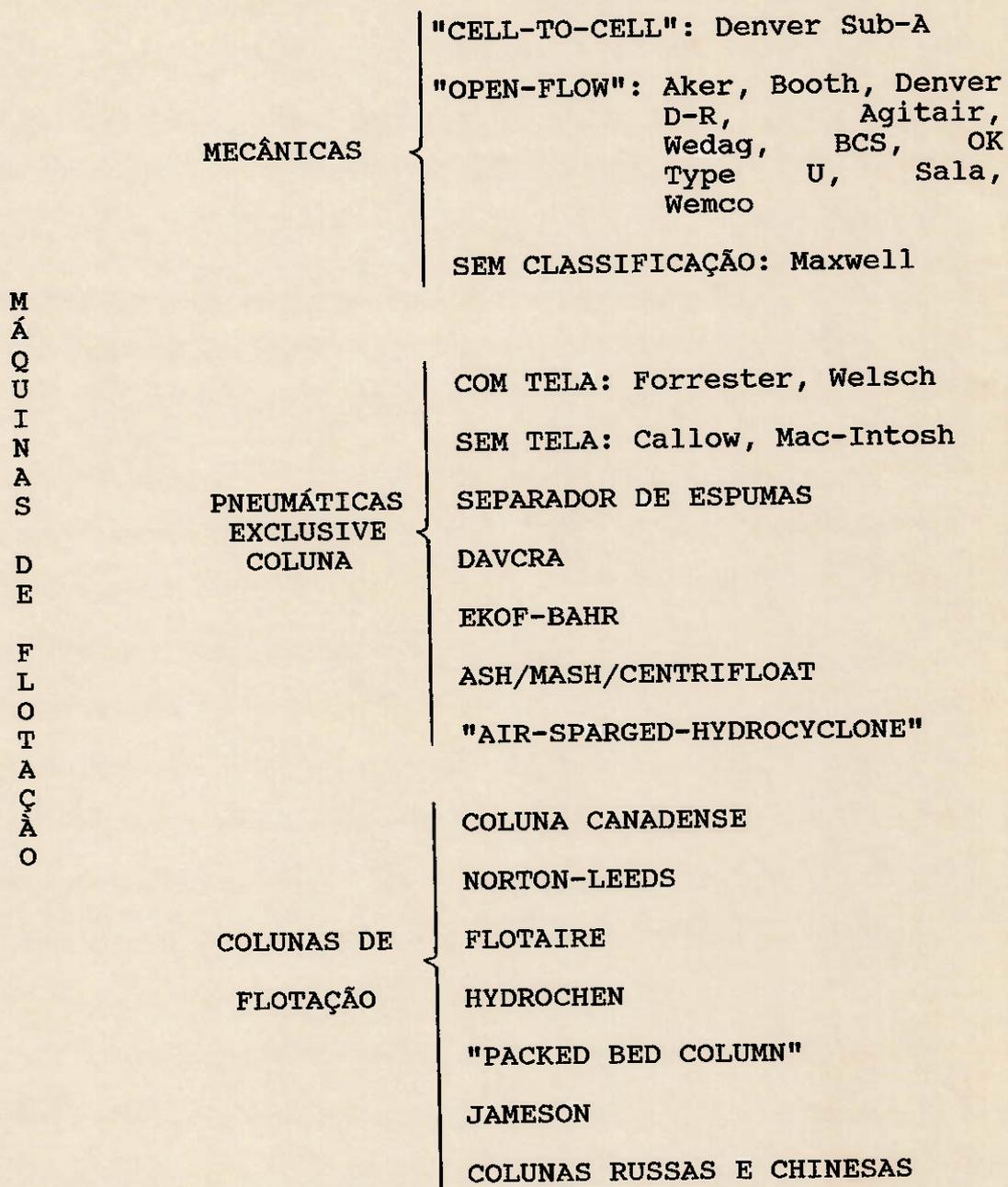


FIGURA 5.4 - CLASSIFICAÇÃO DAS MÁQUINAS DE FLOTAÇÃO

As células mecânicas são as mais comuns, apresentando como característica básica a presença de um impelidor que possui o objetivo de agitar a polpa e dispersar o ar na mesma. Nesta classe de equipamento existem duas classificações [29]:

- . quanto ao fluxo da polpa: máquinas "cell-to-cell" que possuem vertedouro entre cada compartimento e "open-flow" com passagem livre,
- . quanto à aeração: máquinas "supercharged" que recebem ar de sopradores ou compressores e "self-aerating" que usam a depressão criada pelo impelidor para a admissão do ar.

As células mecânicas têm apresentado nos últimos anos desenvolvimento e modificações tecnológicas com o objetivo de produzir melhor dispersão do ar, redução do consumo de reagentes, melhoria na flotação de finos e principalmente redução do custo geral da instalação.

A redução de custo de instalações com células mecânicas foi obtida pelos seguintes caminhos [29]:

- . aumento do volume das máquinas de flotação, que proporcionou diminuição do número de equipamentos, bombeamento, energia elétrica, manutenção e operadores,
- . mudanças no projeto das máquinas de flotação, que proporcionaram a fabricação de equipamentos menos complexos, de manutenção mais simples,
- . utilização cada vez maior de novos materiais alternativos, como cerâmica, borracha, poliuretano

expandido e outros para proteção contra o ataque de reagentes químicos, abrasão e corrosão.

As primeiras células mecânicas foram do tipo "cell-to-cell", mostrada na figura 5.5. Contudo, o fato de seu projeto ser bastante complicado proporcionou o desenvolvimento das máquinas "open-flow" [30]. As máquinas "open-flow" se apresentaram em ascensão devido aos seguintes motivos:

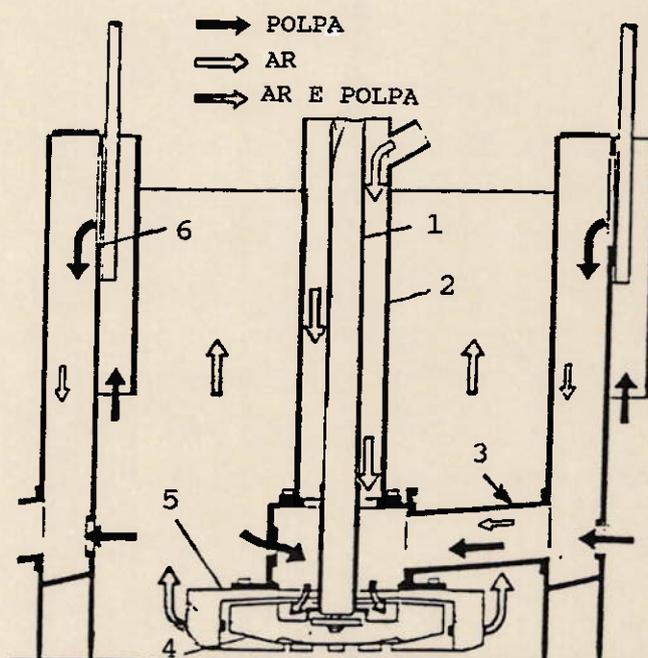
- . construção mais simples e barata,
- . facilidade de manutenção,
- . melhor suspensão das partículas grosseiras,
- . maior capacidade.

As máquinas "cell-to-cell" apresentaram suas maiores aplicações em usinas de pequena capacidade com muitos estágios de limpeza principalmente de partículas finas.

A geometria dos tanques bem como os rotores das máquinas "open-flow" são bastante variados, conforme é mostrado nas figuras 5.6, 5.7, 5.8 e 5.9.

As células Maxwell não se enquadram na classificação clássica das células mecânicas. Essencialmente as células Maxwell podem ser consideradas como condicionadores cilíndricos adaptados para flotação. Foram desenvolvidas por J. R. Maxwell na mina de cobre de Opemiska no Canadá [29].

A segunda classe de máquinas de flotação corresponde às células pneumáticas exclusive coluna. Estas se diferenciam



- 1 . EIXO
- 2 . TUBO
- 3 . TUBO DE ALIMENTAÇÃO
- 4 . IMPELIDOR
- 5 . DIFUSOR
- 6 . VERTEDOIRO AJUSTÁVEL

FIGURA 5.5 - CÉLULA MECÂNICA DO TIPO "CELL-TO-CELL"
MODELO DENVER SUB-A [29]

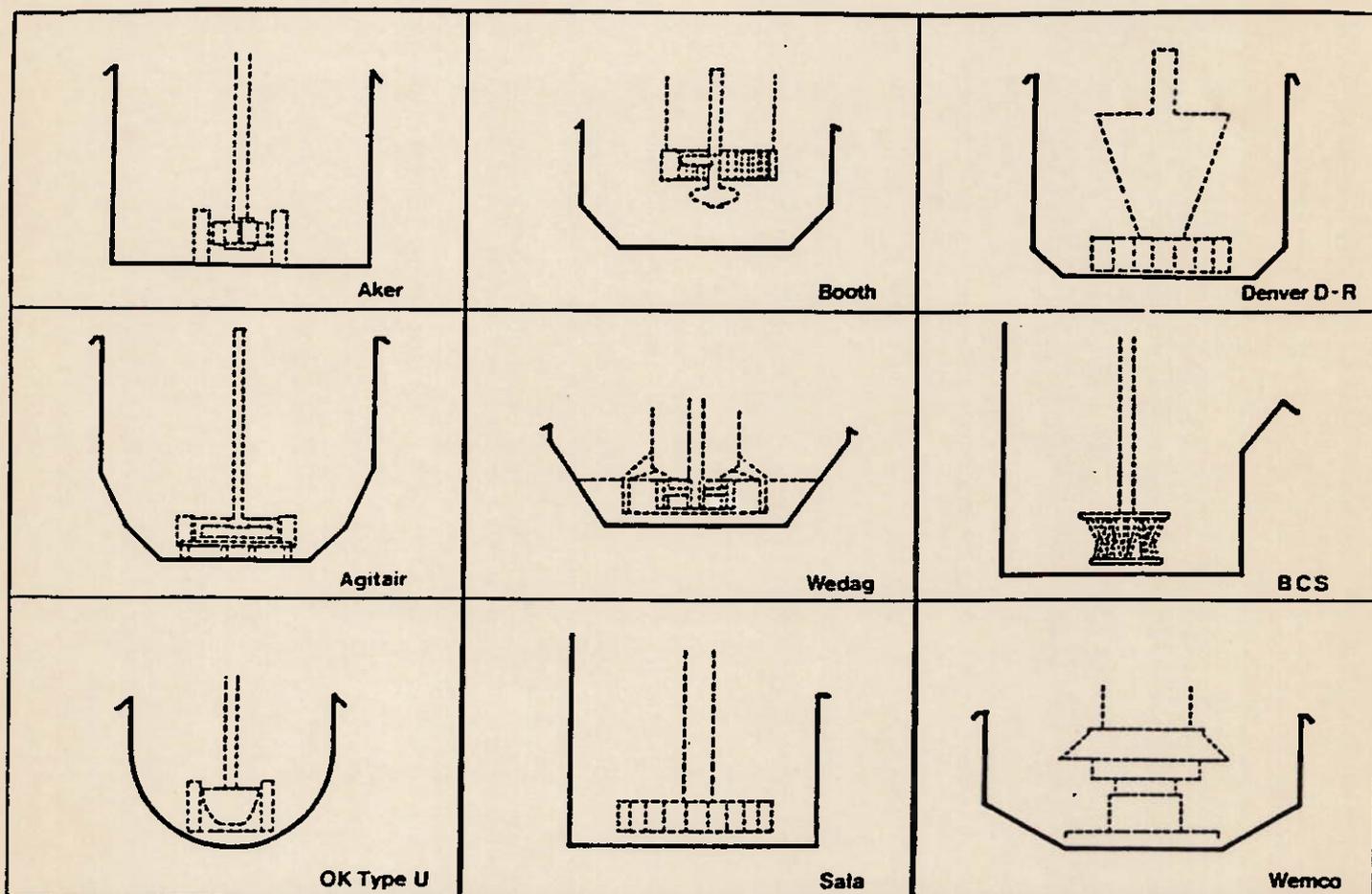
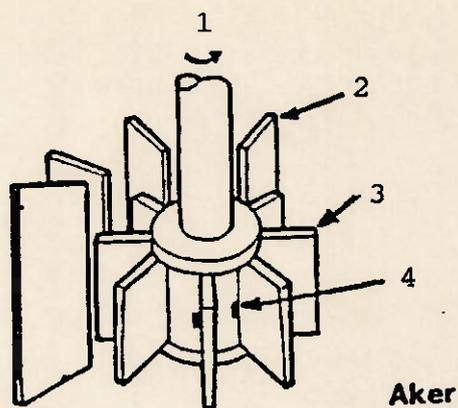


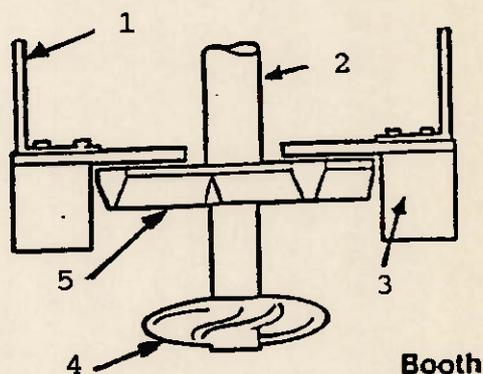
FIGURA 5.6 - GEOMETRIA DOS TANQUES DAS CÉLULAS
"OPEN-FLOW" [29]



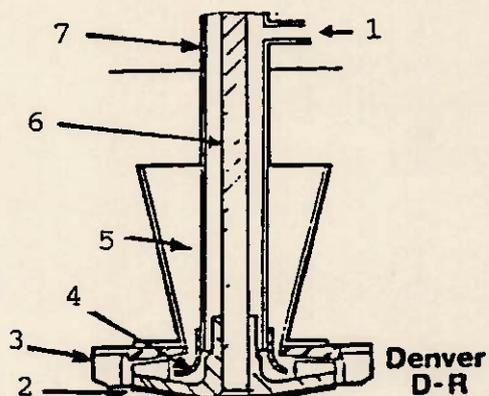
- 1 . ROTAÇÃO
- 2 . DIFUSOR
- 3 . IMPELIDOR
- 4 . SAÍDA DO AR

Aker

- 1 . TUBO
- 2 . EIXO
- 3 . DIFUSOR
- 4 . HÉLICE
- 5 . IMPELIDOR



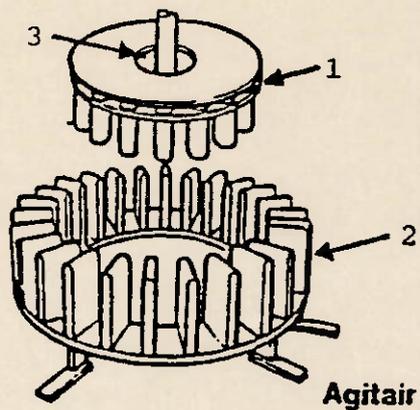
Booth



- 1 . AR
- 2 . IMPELIDOR
- 3 . DIFUSOR
- 4 . SINO
- 5 . POÇO DE RECIRCULAÇÃO
- 6 . EIXO
- 7 . TUBO

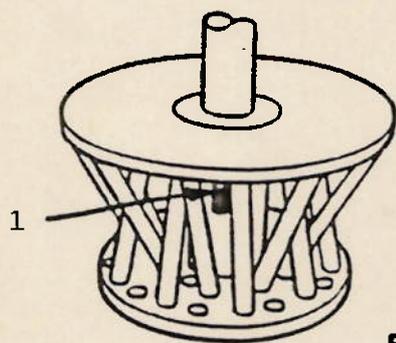
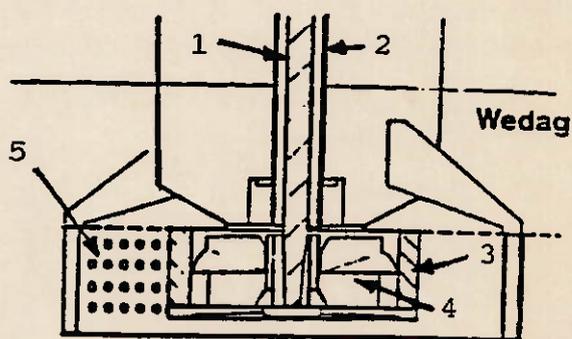
Denver
D-R

FIGURA 5.7 - DETALHES DOS ROTORES DAS CÉLULAS "OPEN-FLOW":
AKER, BOOTH E DENVER D-R [29]



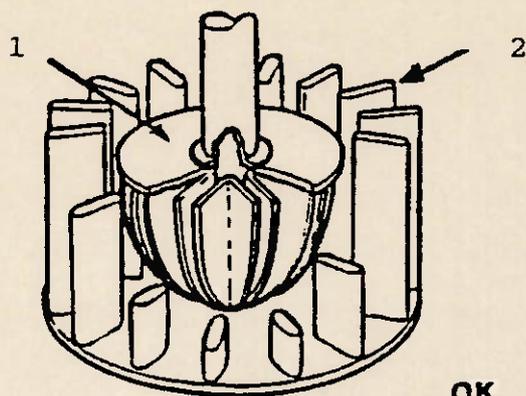
- 1 . ENTRADA DA POLPA
- 2 . IMPELIDOR
- 3 . DIFUSOR

- 1 . EIXO
- 2 . TUBO
- 3 . DIFUSOR
- 4 . IMPELIDOR
- 5 . ESTABILIZADOR



- 1 . SAÍDA DE AR

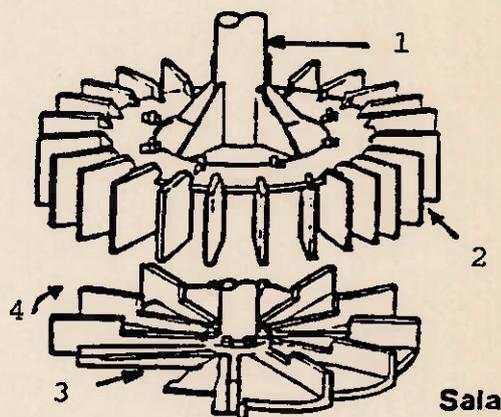
FIGURA 5.8 - DETALHES DOS ROTORES DAS CÉLULAS "OPEN-FLOW":
AGITAIR, WEDAG E BCS [29]



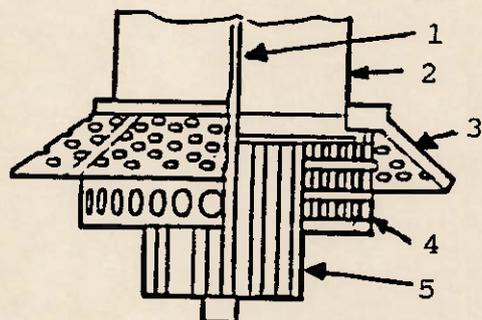
- 1 . IMPELIDOR
- 2 . DIFUSOR

OK

- 1 . TUBO
- 2 . DIFUSOR
- 3 . IMPELIDOR
- 4 . ROTAÇÃO



Sala



- 1 . EIXO
- 2 . TUBO
- 3 . SAIA DO DISPERSOR
- 4 . DISPERSOR
- 5 . ROTOR

Wemco

FIGURA 5.9 - DETALHES DOS ROTORES DAS CÉLULAS "OPEN-FLOW":
OK TYPE U, SALA E WEMCO [29]

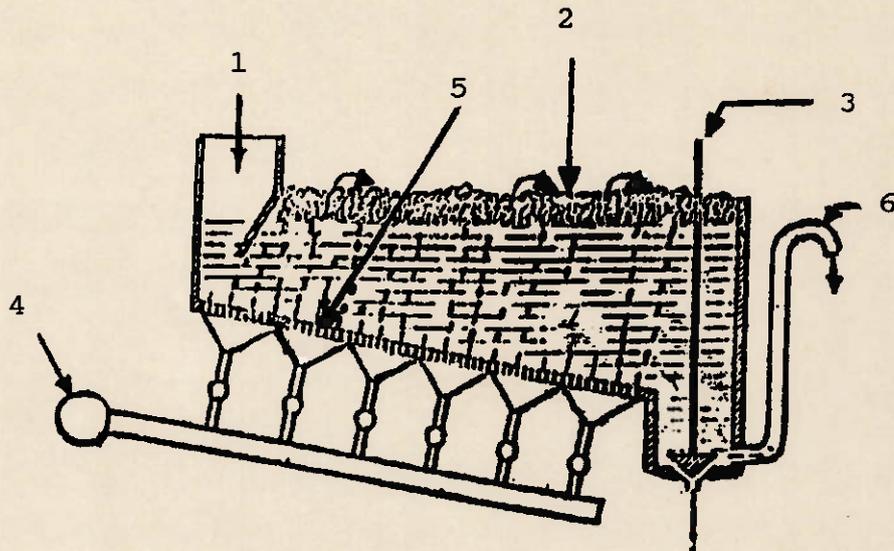
das células mecânicas por não apresentarem impelidores para agitação. A agitação da polpa e a aeração são promovidas por ar comprimido. Não apresentam muitas aplicações no mundo ocidental.

As células pneumáticas podem ser classificadas de acordo com o sistema de injeção de ar [30]:

- . máquinas com tela, nas quais o ar é injetado na parte inferior do equipamento através de um fundo poroso ou rotor oco revestido por uma camisa perfurada, conforme mostrado na figura 5.10,
- . máquinas sem tela, nas quais o ar é injetado na parte superior do equipamento de modo a promover intensa circulação da polpa, conforme mostrado na figura 5.11.

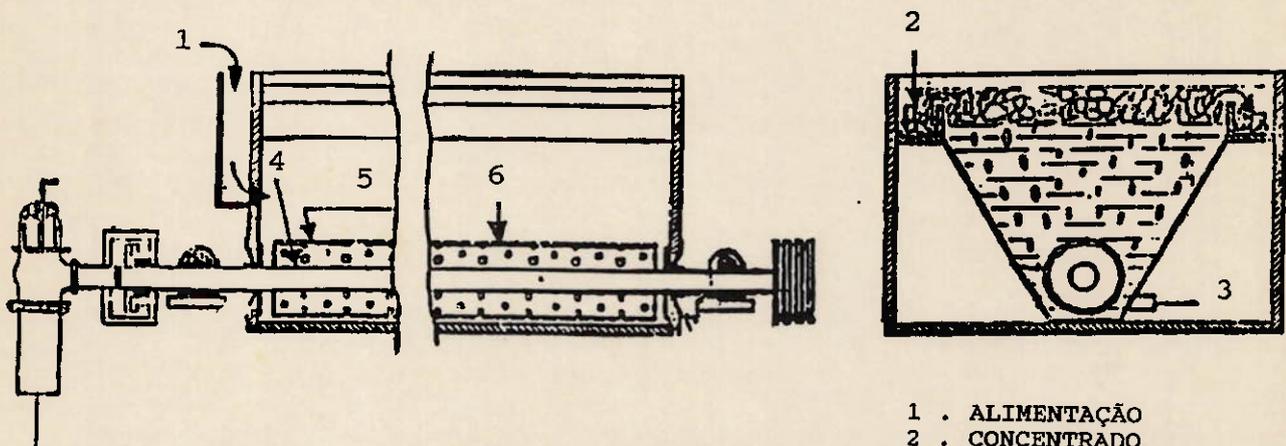
Um outro tipo de célula pneumática são os separadores de espuma. Estes equipamentos foram desenvolvidos primeiramente na antiga U.R.S.S. em 1961, paralelamente à invenção da coluna de flotação no Canadá [29]. Os separadores de espuma apresentaram aplicações industriais anteriores às colunas de flotação. Após uma década de sua invenção, já aproximadamente 8 milhões de toneladas de vários minérios haviam sido tratadas por separadores de espuma.

Os separadores de espuma são caracterizados pela alimentação da polpa condicionada na parte superior do equipamento, na camada de espuma, e não na região de polpa, como ocorre nas células mecânicas e pneumáticas. As partículas hidrofóbicas são retidas na espuma, enquanto as



CÉLULA CALLOW

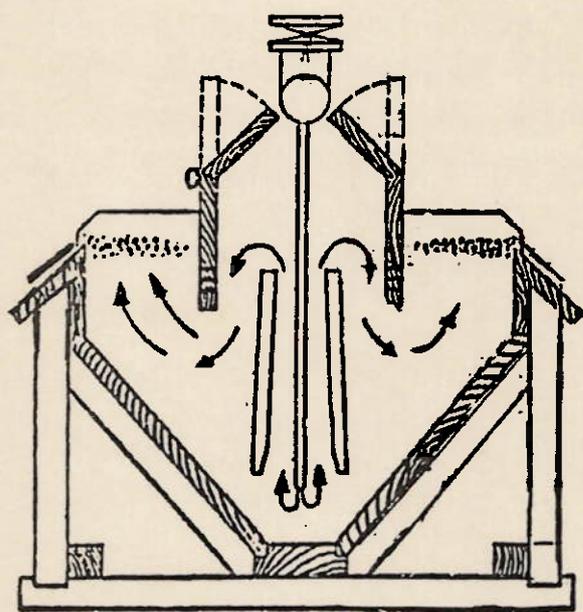
- 1 . ALIMENTAÇÃO
- 2 . CONCENTRADO
- 3 . CONTROLE DO REJEITO
- 4 . AR COMPRIMIDO
- 5 . FUNDO POROSO
- 6 . SIFÃO



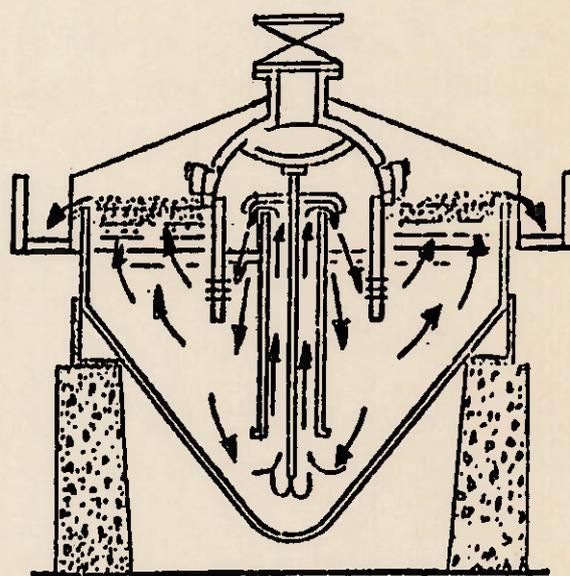
CÉLULA MAC INTOSH

- 1 . ALIMENTAÇÃO
- 2 . CONCENTRADO
- 3 . REJEITO
- 4 . EIXO OCO
- 5 . TAMBOR
- 6 . CAMISA

FIGURA 5.10 - CÉLULA PNEUMÁTICA COM TELA [30]



CÉLULA DE WELSCH



CÉLULA FORRESTER

FIGURA 5.11 - CÉLULA PNEUMÁTICA SEM TELA [30]

hidrofílicas passam pela espuma sendo descartadas no rejeito, conforme é mostrado na figura 5.12. A alimentação é portanto filtrada na camada de espuma. O equipamento apresenta boas características devido ao fato de possuir uma considerável região de espuma, baixa turbulência e boa adesão partícula-bolha. Devido a estas características, os separadores de espuma apresentam os seguintes benefícios:

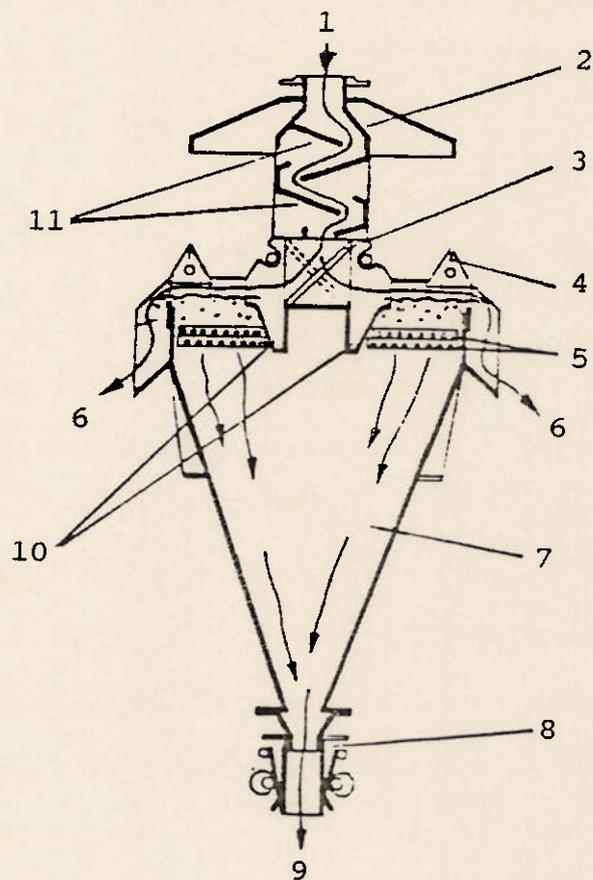
- . flotação de partículas relativamente grosseiras,
- . redução do consumo de energia devido ao favorecimento da cinética da flotação,
- . redução de custos de moagem para minérios de liberação em malhas mais grossas, devido à possibilidade de flotação de partículas mais grossas.

O separador de espumas pode ser utilizado como "rougher", "scavenger" e "cleaner", podendo ser configurado em circuitos em série e contracorrentes.

A célula DAVCRA foi desenvolvida por Davis, superintendente da ZINC CORPORATION, na Austrália, no início da década de 60 [29].

Este equipamento apresenta uma grande simplicidade mecânica, constituindo-se de uma caixa retangular aberta na parte superior.

A polpa alimentada possui trajetória em redemoinho, misturando-se intimamente com o ar comprimido, podendo causar problemas de desgaste. A célula DAVCRA consegue sustentar uma camada de espuma bastante espessa,



- 1 . ALIMENTAÇÃO
- 2 . TANQUE DE ALIMENTAÇÃO
- 3 . DIVISOR DE FLUXO
- 4 . ESCUMADEIRA
- 5 . AERADOR
- 6 . CONCENTRADO
- 7 . TANQUE CÔNICO
- 8 . VÁLVULA
- 9 . REJEITO
- 10 . CANAL DE AERAÇÃO
- 11 . "BAFFLES"

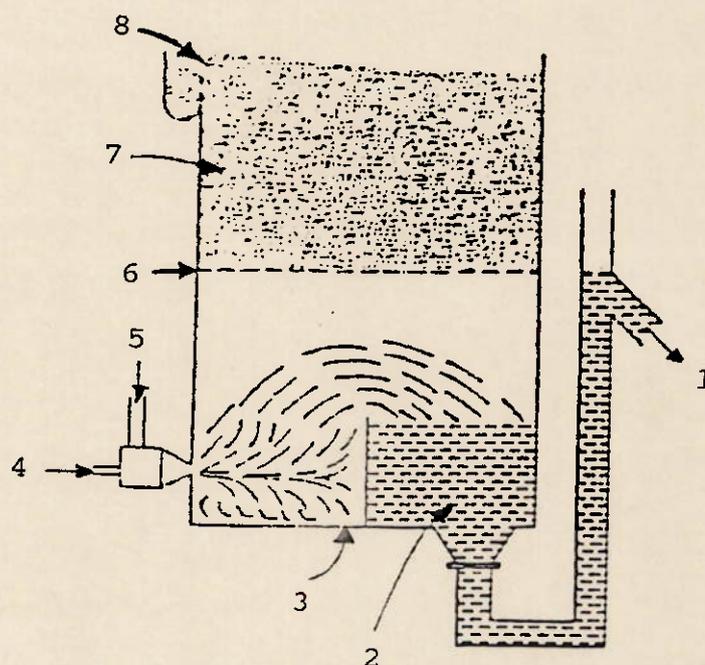
FIGURA 5.12 - SEPARADOR DE ESPUMAS [29]

proporcionando altas taxas de flotação e seletividade. Não possui sistema de lavagem da camada de espuma. A célula DAVCRA foi a precursora do desenvolvimento desta classe de equipamentos. Na figura 5.13 é apresentado o esquema de uma célula DAVCRA.

A célula EKOF/BAHR é formada por um corpo cônico com alimentação radial distribuída em vários pontos e descarga central [31] (figura 5.14). No Chile é utilizada na flotação de sulfetos. Atualmente vem sendo utilizada em tratamento de esgoto na Alemanha.

O CENTRIFLOAT é caracterizado por apresentar a flotação ocorrendo num sistema similar a um hidrociclone, conforme apresentado na figura 5.15 [32]. O processo de flotação é rápido, sendo esta uma característica dos hidrociclones. A alimentação é feita tangencialmente num cilindro produzindo um campo radial de alta gravidade. O corpo do hidrociclone é uma parede porosa por onde o ar é alimentado em bolhas bastante pequenas. Forma-se a fase de espuma na parte central do corpo cilíndrico do equipamento, sendo que o material flotado é encaminhado para a parte superior separando-se do material não flotado. A Universidade de Utah desenvolveu um equipamento nesta concepção, o qual é chamado de "air-sparged-hydrocyclone", ilustrado na figura 5.16.

O terceiro tipo de máquina de flotação corresponde às colunas de flotação. Este tipo de equipamento é caracterizado pelos fluxos em contracorrente entre ar e material não flotado e entre água de chuveiro e material flotado. As colunas de flotação podem ser consideradas como



- 1 . BOMBEAMENTO
- 2 . ZONA DE DESAERAÇÃO
- 3 . ZONA DE GERAÇÃO DE BOLHAS
- 4 . POLPA
- 5 . AR
- 6 . NÍVEL DA POLPA
- 7 . ESPUMA
- 8 . "OVERFLOW"

FIGURA 5.13 - CÉLULA DAVCRA [32]

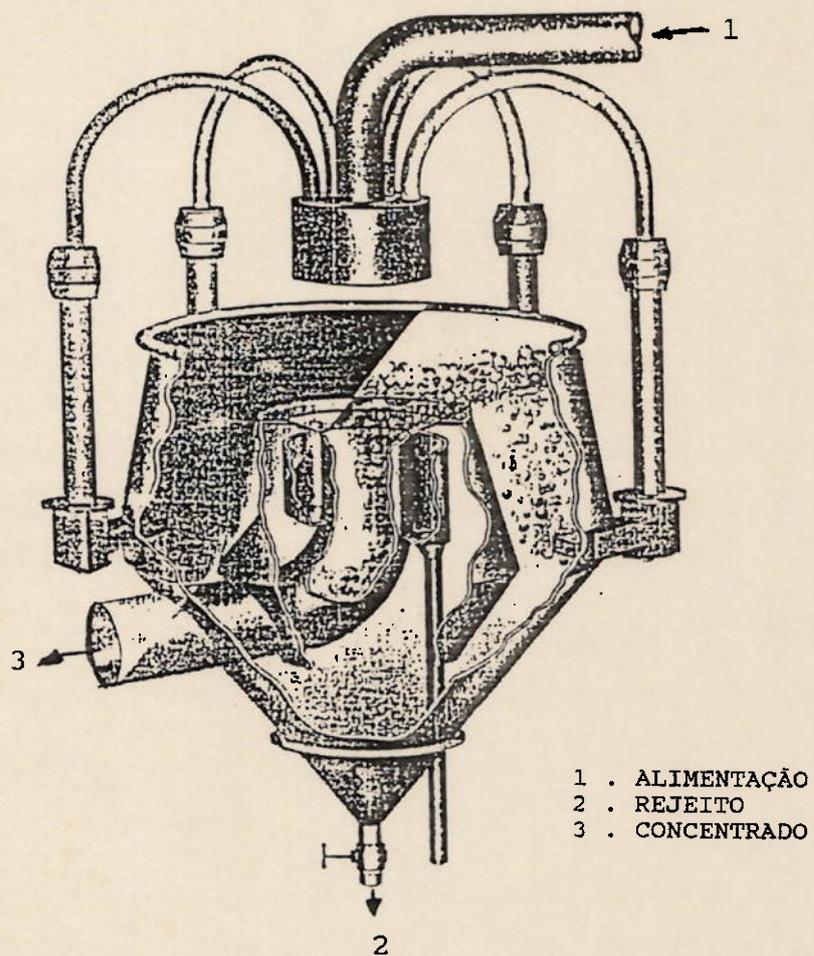
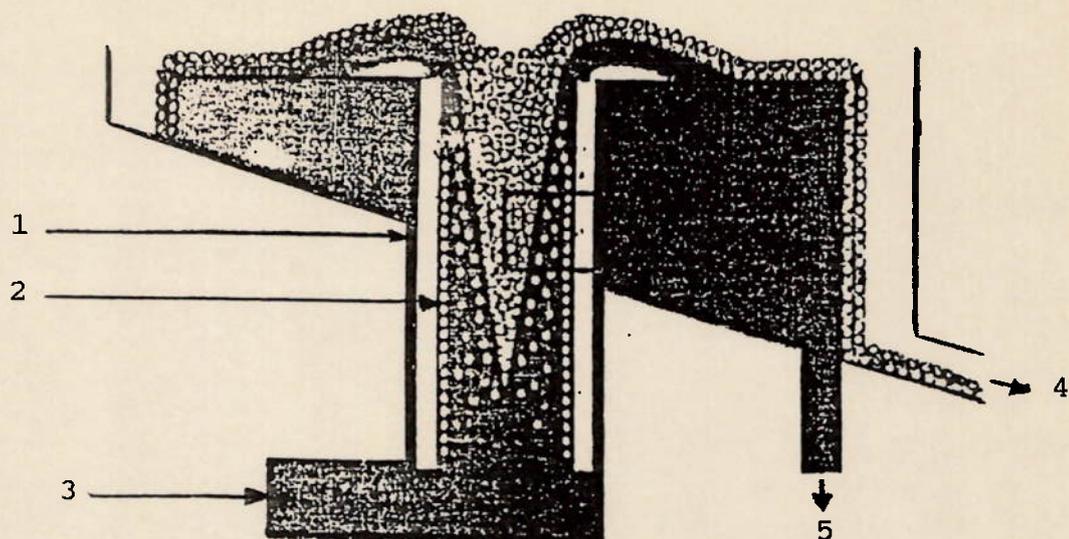
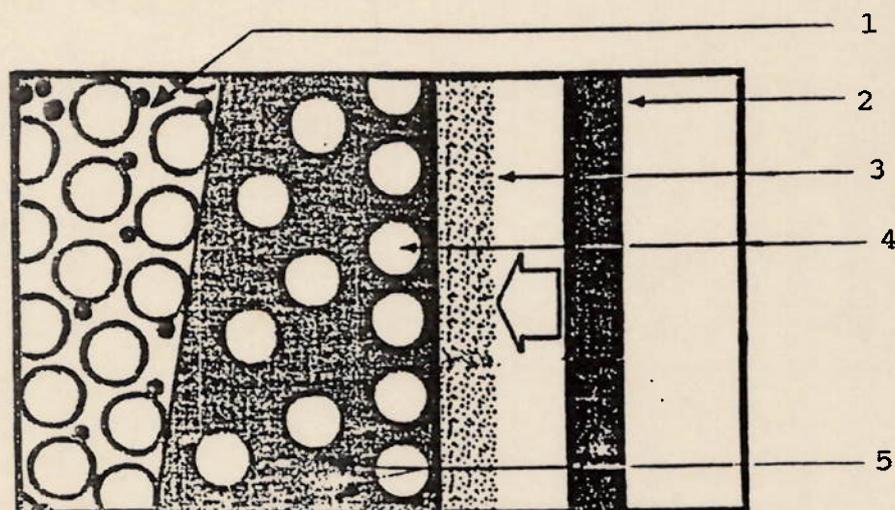


FIGURA 5.14 - CÉLULA BAHR [32]

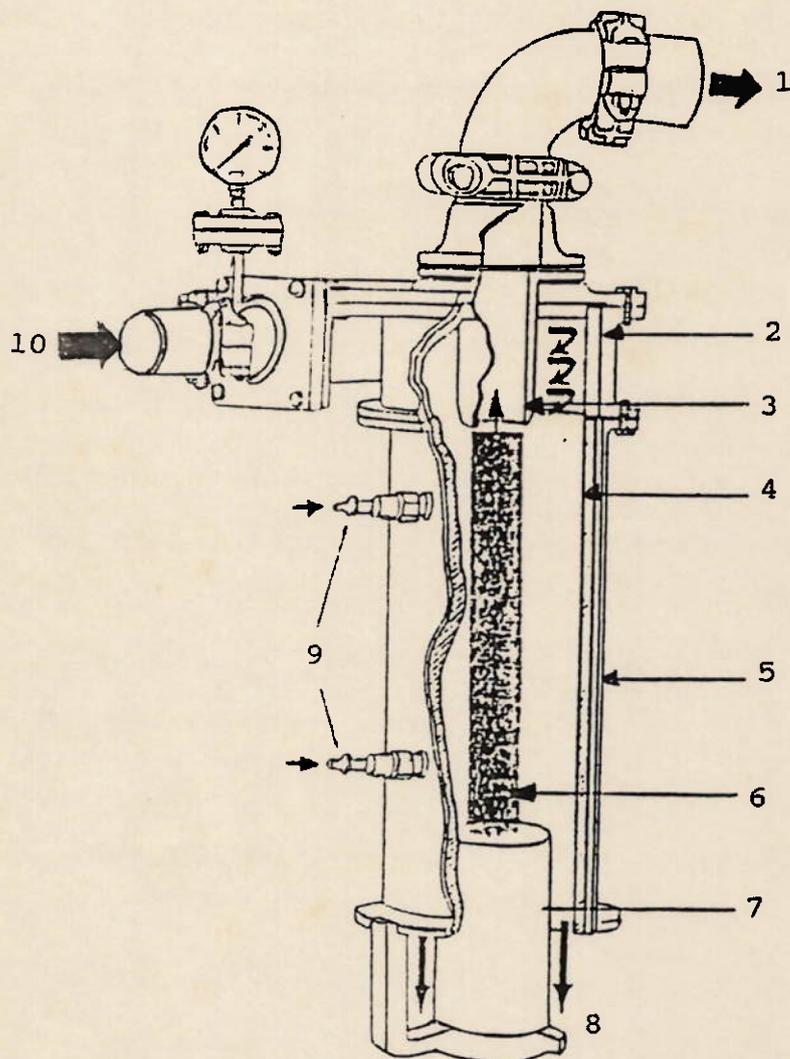


- 1 . PAREDE EXTERNA
- 2 . PAREDE POROSA
- 3 . ALIMENTAÇÃO
- 4 . MATERIAL HIDROFÓBICO
- 5 . MATERIAL HIDROFÍLICO



- 1 . ESPUMA
- 2 . PAREDE EXTERNA
- 3 . PAREDE POROSA
- 4 . BOLHAS DE AR
- 5 . POLPA

FIGURA 5.15 - CENTRIFLOAT [32]



- . "OVERFLOW"
- . CABEÇA
- . "VORTEX"
- . CILINDRO POROSO
- . CAMISA DO CILINDRO
- . ESPUMA
- 7 . PEDESTAL DE ESPUMA
- 8 . "UNDERFLOW"
- 9 . AR
- 10 . ALIMENTAÇÃO DA POLPA

FIGURA 5.16 - "AIR-SPARGED-HYDROCYCLONE" [32]

máquinas pneumáticas apesar de algumas apresentarem sistema de agitação. Contudo, devido a seu inegável avanço tecnológico e crescente aplicação na indústria, a coluna de flotação será considerada como uma classe a parte. As características das colunas de flotação são apresentadas detalhadamente no item 5.3.3.

As células mecânicas atualmente ainda contribuem para o maior volume tratado na concentração de minerais. A necessidade de lavra de minérios cada vez mais pobres e de difícil concentração, bem como as exigências de melhor qualidade e menor custo impostas pelo mercado, tornam necessário, cada vez mais, o desenvolvimento de máquinas de flotação mais adaptadas a esta situação. Dentro deste contexto vemos cada vez mais o crescimento de colunas de flotação.

5.3.3 Coluna de flotação

A flotação em coluna foi desenvolvida a partir do princípio de fluxos contracorrentes e ausência de sistema de agitação.

As células mecânicas prevaleceram sobre as pneumáticas durante muitas décadas. Contudo, a partir do desenvolvimento da coluna de flotação e suas aplicações industriais, principalmente na década de 80, houve uma retomada da utilização dos conceitos das células pneumáticas. Este fato tem levado a constantes desenvolvimentos nas máquinas de flotação com conceito pneumático.

5.3.3.1 Histórico

A história da coluna de flotação começa a partir da invenção deste equipamento pelos cientistas canadenses Remi Tremblay e Pierre Boutin em 1961 pelas patentes canadenses 680576 e 694547 [33], [34]. Desde os primeiros ensaios realizados no Canadá, os russos e chineses também desenvolveram colunas de flotação. As primeiras descrições da coluna de flotação foram feitas P. Boutin e D. A. Wheeler na metade da década de 60 [35].

Nas primeiras duas décadas o desenvolvimento da coluna de flotação foi lento e restrito às unidades piloto. Algumas tentativas de unidades de maior porte foram feitas, contudo com muitos problemas mecânicos que quase inviabilizaram a continuidade de sua utilização [36].

Finalmente, em 1980, a Mines Gaspé Division da Noranda Mines optou pela utilização de coluna de flotação na concentração de molibdênio em Murdochville na província de Quebec no Canadá. O circuito original constituiu-se de duas colunas de flotação de diâmetro de 36" (915 mm) e 18" (460 mm) em série. Depois de 16 meses de operação uma coluna de flotação de 72" (1830 mm) foi incorporada ao circuito devido ao fato da coluna de 36" (915 mm) não possuir volume suficiente para a alimentação do primeiro estágio "cleaner". As três colunas de flotação substituíram os 13 estágios "cleaner" com concentrado mais rico e maior recuperação [35].

A partir de então as colunas de flotação se espalharam rapidamente no Canadá, Austrália, África do Sul e

principalmente na América do Sul, mais precisamente no Chile e Brasil [37].

No Chile as principais utilizações da coluna estão na concentração de cobre de Chuquicamata, El Teniente e outras.

No Brasil, a primeira instalação industrial de grandes dimensões foi na concentração de minério de ferro da Samarco Mineração, em 1991. O circuito constituiu-se de 4 colunas "cleaner" de 3,66 metros de diâmetro cada e uma coluna "scavenger" de 2,44 metros [38]. Outras unidades de concentração de minério de ferro implantaram recentemente ou estão implantando colunas de flotação, tais como a CSN - Companhia Siderúrgica Nacional (Mineração Casa de Pedra), MBR - Minerações Brasileiras Reunidas (Mina do Pico), a CVRD - Companhia Vale do Rio Doce (Mina de Timbopeba e Conceição) e a SAMITRI - S.A. Mineração da Trindade (Mina de Alegria).

No beneficiamento de minério fosfático o primeiro circuito instalado foi da antiga Fosfértil em Patos de Minas, Minas Gerais, com duas colunas de 1,20 metros de diâmetro, que entraram em operação em 1989. As primeiras unidades de grande porte foram as colunas de flotação de finos naturais e finos gerados da Arafértil S.A. que entraram em operação no início de 1993. Cada linha de flotação possui uma coluna de flotação retangular com 3,0 x 4,5 metros de dimensões e 14,5 metros de altura total. Em 1994 foram colocadas em operação as colunas de flotação do circuito de flotação de barita, apatita de grossos e remoído, que será detalhado nos capítulos seguintes.

Além da Arafertil, o grupo Fertifós implantou colunas de flotação na etapa "cleaner" da concentração de finos de apatita de Tapira, estando em projeto a flotação de grossos em Tapira e também na unidade de Catalão, em Goiás.

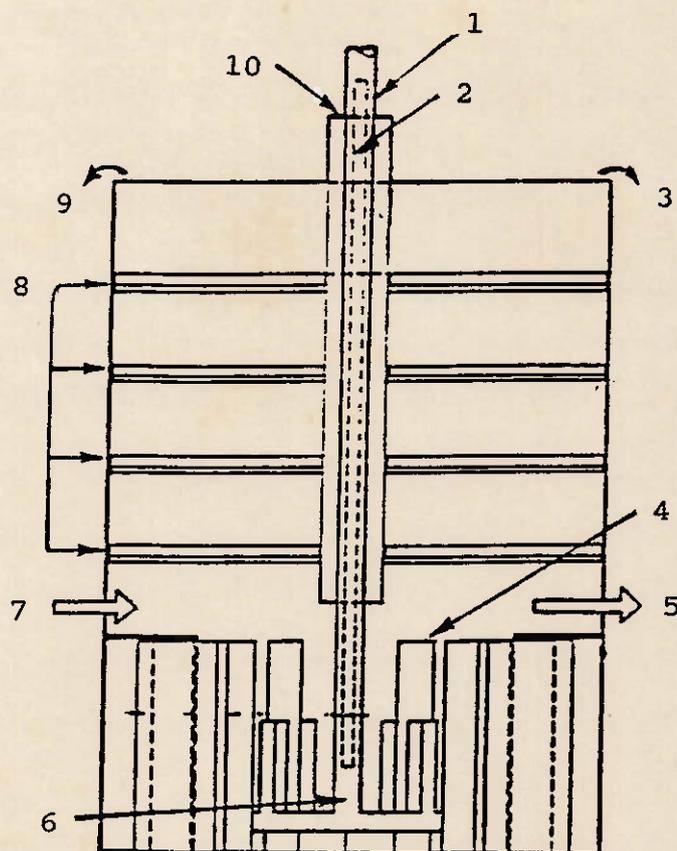
Existem vários desenhos de colunas de flotação. Dentre eles podemos citar: coluna canadense, Norton-Leeds, Flotaire, Hydrochen, "packed bed column", Jameson e vários modelos russos e chineses.

A coluna canadense, a qual denominamos simplificada de coluna de flotação será detalhada nos itens a seguir.

A coluna Norton-Leeds foi desenvolvida por Dell e Jenkins em 1976 na Universidade de Leeds na Inglaterra [23]. Constitui-se essencialmente de um sistema onde a lavagem do flotado ocorre em múltiplos estágios numa mesma unidade compacta. A coluna apresenta um impelidor na parte inferior do equipamento onde é recebido o ar por dois tubos que descem verticalmente na parte central, conforme mostrado na figura 5.17.

As células Flotaire foram desenvolvidas por Zipperian e Svenson sendo construídas pela Deister. O borbulhamento da polpa é feito hidraulicamente e não com agitação mecânica ou ar comprimido [39]. Injeta-se, na parte inferior do equipamento, água que sob pressão aspira o ar. A alimentação é feita pela parte superior da coluna, promovendo fluxo contracorrente entre polpa e ar. Não apresenta água de lavagem da camada de espuma. A figura 5.18 ilustra o esquema da célula Flotaire.

A coluna Hydrochen foi desenvolvida por Shneider e Van Weert em 1988 [32]. O equipamento caracteriza-se por



- 1 . EIXO
- 2 . LINHA DE AR
- 3 . ESPUMA
- 4 . "BAFFLES"
- 5 . REJEITO
- 6 . IMPELIDOR
- 7 . ALIMENTAÇÃO
- 8 . NÍVEIS DA BARREIRA
- 9 . ESPUMA
- 10 . ÁGUA DE LAVAGEM

FIGURA 5.17 - COLUNA NORTON-LEEDS [29]

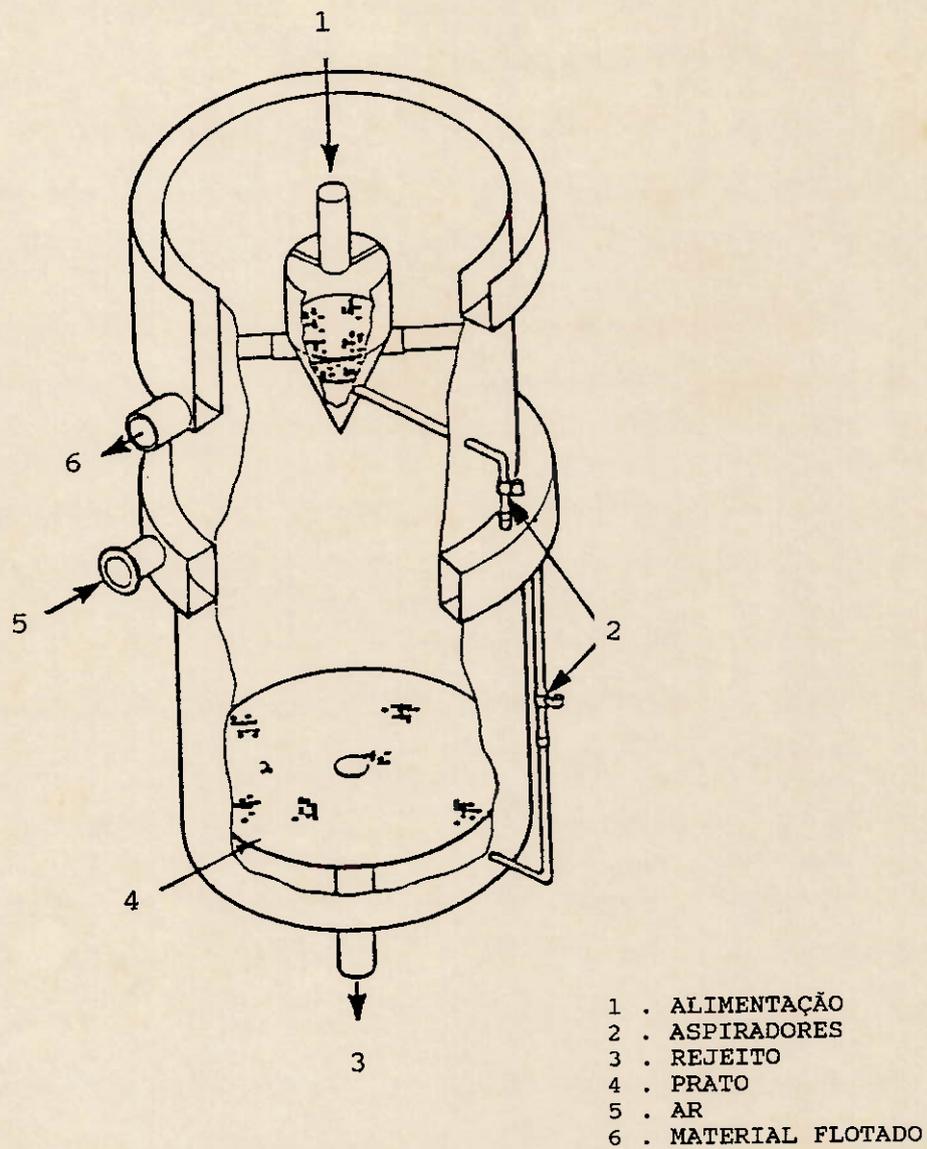


FIGURA 5.18 - COLUNA FLOTAIRE [29]

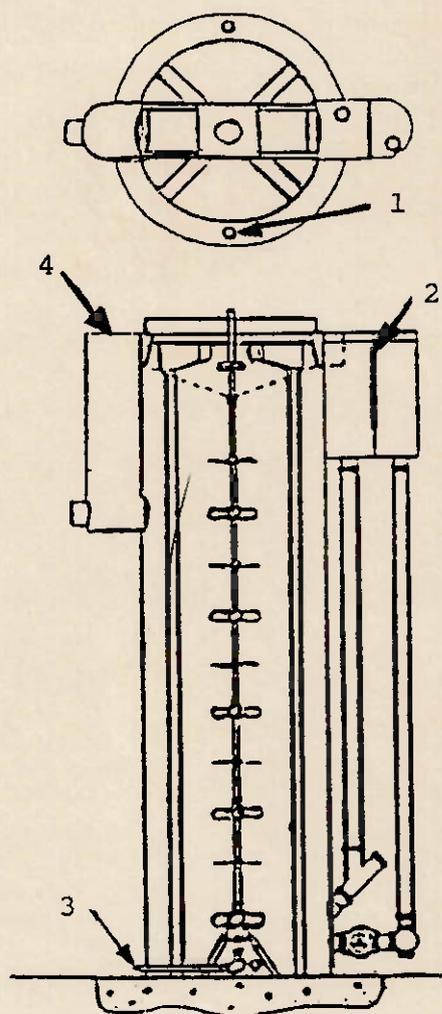
apresentar um agitador central com várias pás, conforme mostrado na figura 5.19. A coluna Hydrochen tem apresentado aplicações em minério de ouro no Canadá.

A "packed bed column", fabricada pela Dorr Oliver, é caracterizada por apresentar todo o corpo preenchido por chapas, conforme mostrado na figura 5.20 [40]. É um equipamento que apresenta problemas operacionais pelo entupimento desta malha metálica contida no interior da coluna [32].

A célula Jameson foi desenvolvida por Graeme Jameson na Universidade de Newcastle na Austrália em 1988 [41], [42]. A célula Jameson apresenta alimentação na parte superior num tubo que recebe o nome de "downcomer", mostrado na figura 5.21. Na parte inferior do "downcomer" a polpa entra em contato com o ar gerando uma grande camada de espuma [43], [44]. O tempo de residência da célula Jameson é bastante pequeno sendo da ordem de 20 segundos no "downcomer" e menos de 2 minutos na célula. É um equipamento de estabilização rápida e de alta seletividade. Existe uma grande variedade de colunas de flotação, sendo aqui citadas apenas as mais importantes. Apesar desta grande diversidade, a coluna canadense é a que tem apresentado um índice maior de aplicações não só no Brasil como em todo do mundo.

5.3.3.2 Características de funcionamento

A figura 5.22 mostra esquematicamente uma coluna de flotação.



- 1 . DESCARGA DE CONCENTRADO
- 2 . CONTROLE DE NÍVEL
- 3 . AR
- 4 . ALIMENTAÇÃO

FIGURA 5.19 - COLUNA HYDROCHEN [32]

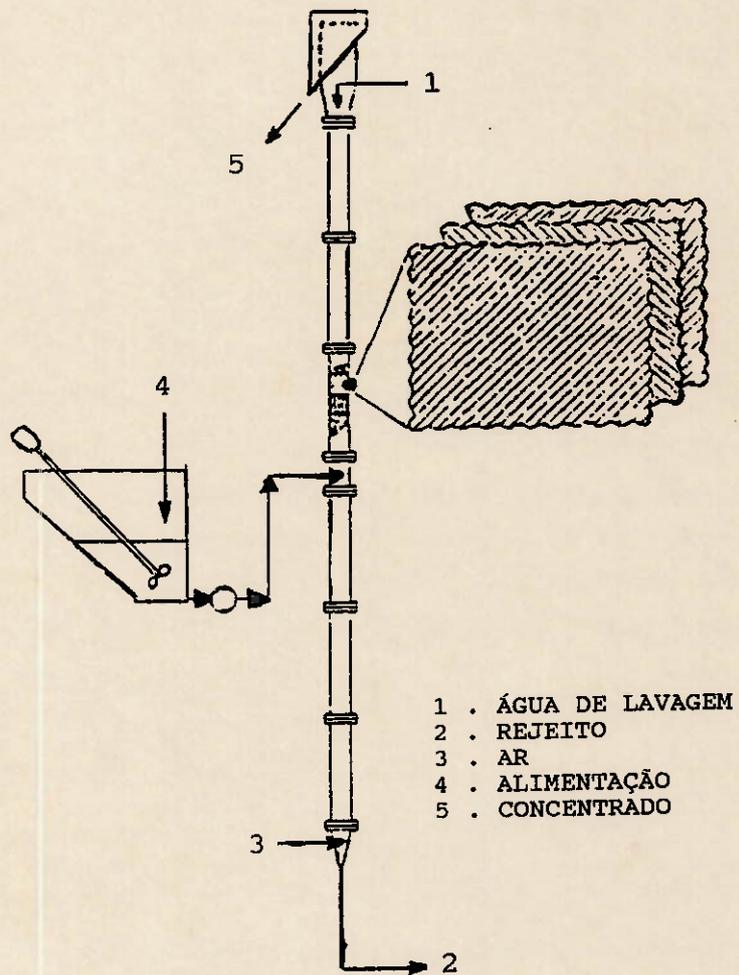


FIGURA 5.20 - "PACKED BED COLUMN" [32]

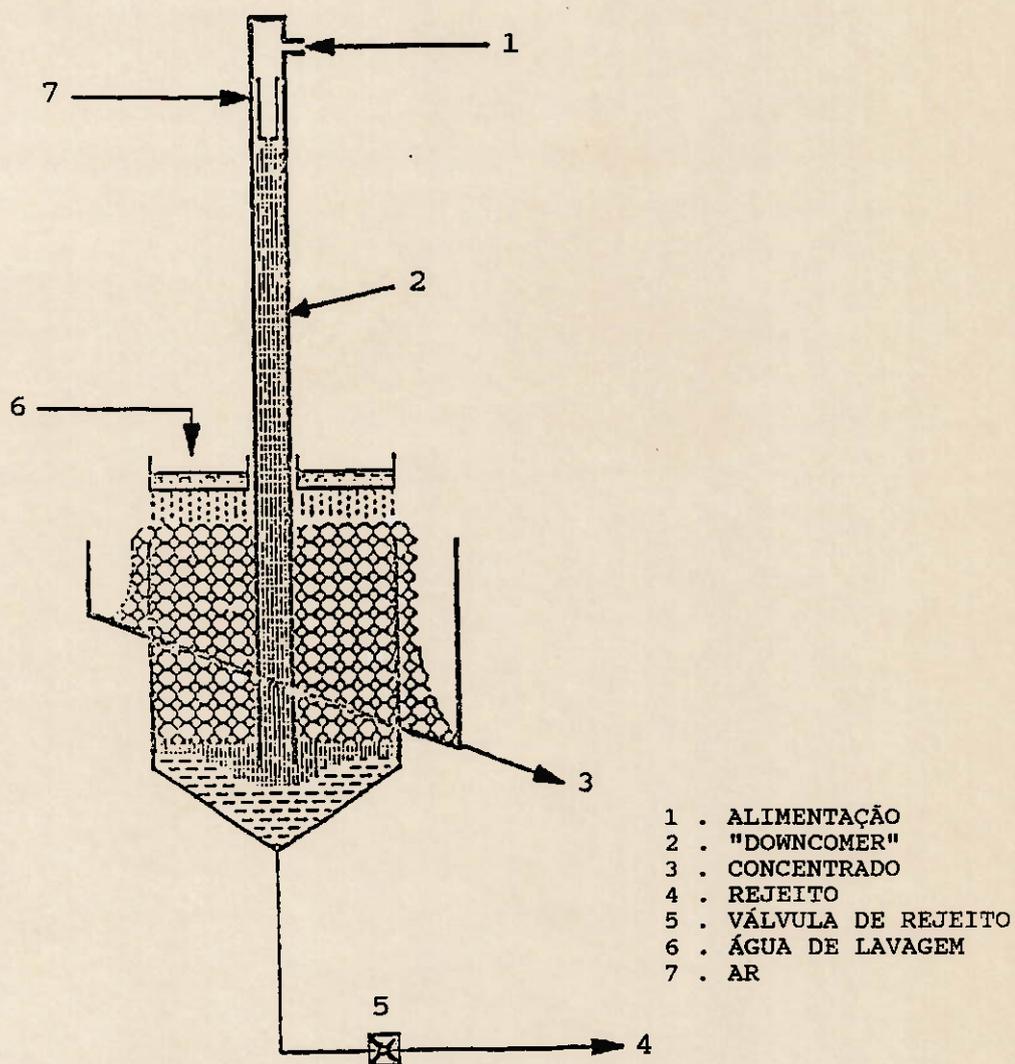


FIGURA 5.21 - CÉLULA JAMESON [41]

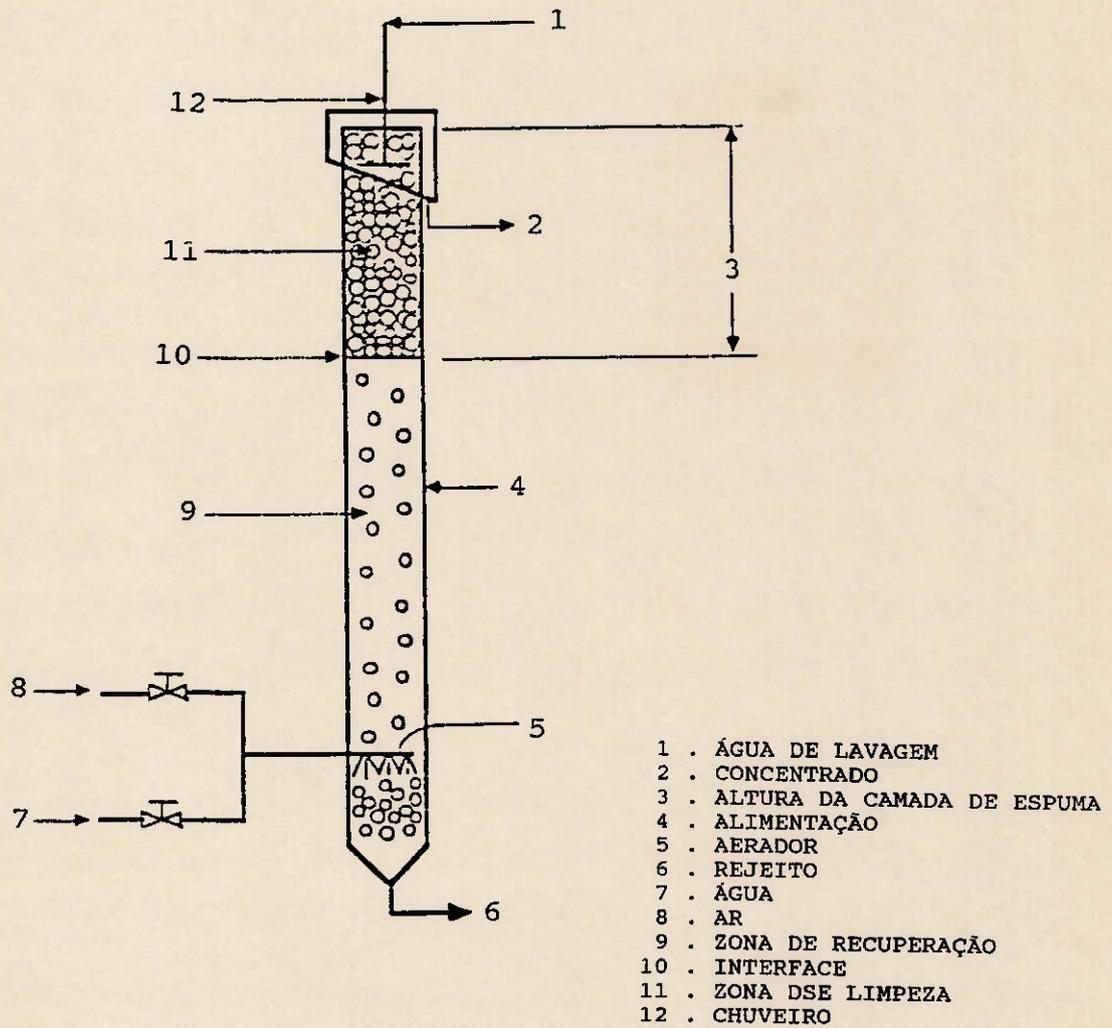


FIGURA 5.22 - ESQUEMA DA COLUNA DE FLOTAÇÃO

Basicamente a coluna de flotação consiste de duas zonas distintas [42]:

- . zona de coleta, situada da entrada do ar até a interface polpa-espuma,
- . zona de limpeza, situada da interface até a descarga do concentrado.

Na zona de coleta as partículas da alimentação entram em contato em fluxo contracorrente com as bolhas de ar geradas e distribuídas na parte inferior do equipamento. As partículas hidrofóbicas são transportadas para a camada de espuma enquanto as partículas hidrofílicas são retiradas pelo fundo da coluna.

A camada de espuma recebe água por chuveiro interno ou externo, com o objetivo de lavar a espuma, diminuindo o arraste de partículas indesejáveis, melhorando portanto a seletividade. O fluxo líquido de água entre a água de lavagem da camada de espuma e a água do concentrado, expresso em termos de velocidade superficial, recebe o nome de "bias". Quando o fluxo líquido de água é descendente tem-se "bias" positivo, garantindo uma melhor eficiência na lavagem do flotado. A existência de "bias" positivo previne o arraste hidráulico de partículas para o flotado.

Portanto, as principais diferenças entre coluna de flotação e célula mecânica são:

- . presença de água de lavagem da camada de espuma,

- . ausência de agitação mecânica,
- . sistema de geração de bolhas.

As colunas de flotação comerciais apresentam normalmente diâmetros de 0,5 a 4,0 metros e alturas entre 9 e 15 metros. Para colunas com diâmetros maiores que 1,2 metros é comum a colocação de divisões internas.

Até pouco tempo as colunas se limitavam ao diâmetro de 2,4 metros. Para circuitos de grande capacidade seriam necessários vários equipamentos em paralelo, aumentando o investimento e os custos de operação e manutenção. A instalação de equipamentos de alta capacidade só foi possível com a melhoria do sistema de alimentação da polpa, distribuição da água de lavagem, condições de dispersão interna e sistema de geração e distribuição do ar.

As principais variáveis de operação e características de construção de uma coluna de flotação são:

- . fluxo da polpa,
- . fluxo de ar,
- . tamanho das bolhas de ar,
- . tamanho das partículas dos minerais,
- . água de lavagem,
- . distribuição da água de lavagem,
- . altura da camada de espuma,
- . interface polpa-espuma,
- . porcentagem de sólidos da polpa alimentada,
- . utilização de "baffles" internos,
- . descarga do rejeito,

- . capacidade de carreamento,
- . "lip loading",
- . tempo médio de residência,
- . número de dispersão,
- . geometria da coluna de flotação,
- . sistema de instrumentação e controle.

FLUXO DA POLPA

A taxa de alimentação na coluna de flotação não pode exceder a capacidade de projeto da coluna. Caso isto ocorra haverá diminuição do tempo de residência afetando diretamente a cinética da flotação, já que o dimensionamento do equipamento é feito como um fenômeno químico o qual apresenta uma equação cinética geralmente de primeira ordem.

A polpa ao ser alimentada na coluna não deve apresentar pulsações nem provocar excesso de turbulência, para não haver dispersão axial exagerada na zona de recuperação, podendo afetar inclusive a nitidez da interface polpa-espuma [45].

FLUXO DE AR

As colunas de flotação apresentam um fluxo de ar ótimo dependendo do tipo de mineral, da recuperação em massa do flotado, da granulometria e do tamanho das bolhas. É comum expressarmos o fluxo de ar em termos de velocidade superficial (J_g), que é definida como a razão entre a vazão de ar nas CNTP e a área da secção da coluna de flotação. Utilizando-se esta nomenclatura, verifica-se que as

instalações industriais apresentam velocidade do ar na faixa de 0,5-3,0 cm/s.

A escassez de ar provoca baixa recuperação devido à deficiência do contato bolha-mineral, enquanto que o excesso de ar tem também mostrado perda de recuperação na experiência industrial [46]. Xu e Finch [47] explicam este fenômeno por três causas:

- . falta de controle da interface polpa-espuma,
- . perda do "bias" positivo,
- . coalescência das bolhas (regime de falta de controle do tamanho das bolhas).

Devido a este fato existe uma velocidade superficial do ar ótima com a qual é possível obtermos alta recuperação sem perdermos a seletividade do processo.

A figura 5.23 representa esquematicamente este fenômeno relacionando J_g com o "hold up" do gás. O "hold up" do gás, representado por ξ_g , é definido como a porcentagem volumétrica que o ar ocupa na zona de recuperação da coluna de flotação. Verifica-se que a partir de um determinado valor de J_g não ocorre mais aumento do "hold up" devido ao aumento de J_g . Neste ponto já não ocorre mais o controle do processo de aeração, com presença de bolhas grandes provenientes da coalescência das bolhas. A recuperação aumenta até o ponto que ξ_g aumenta linearmente com J_g .

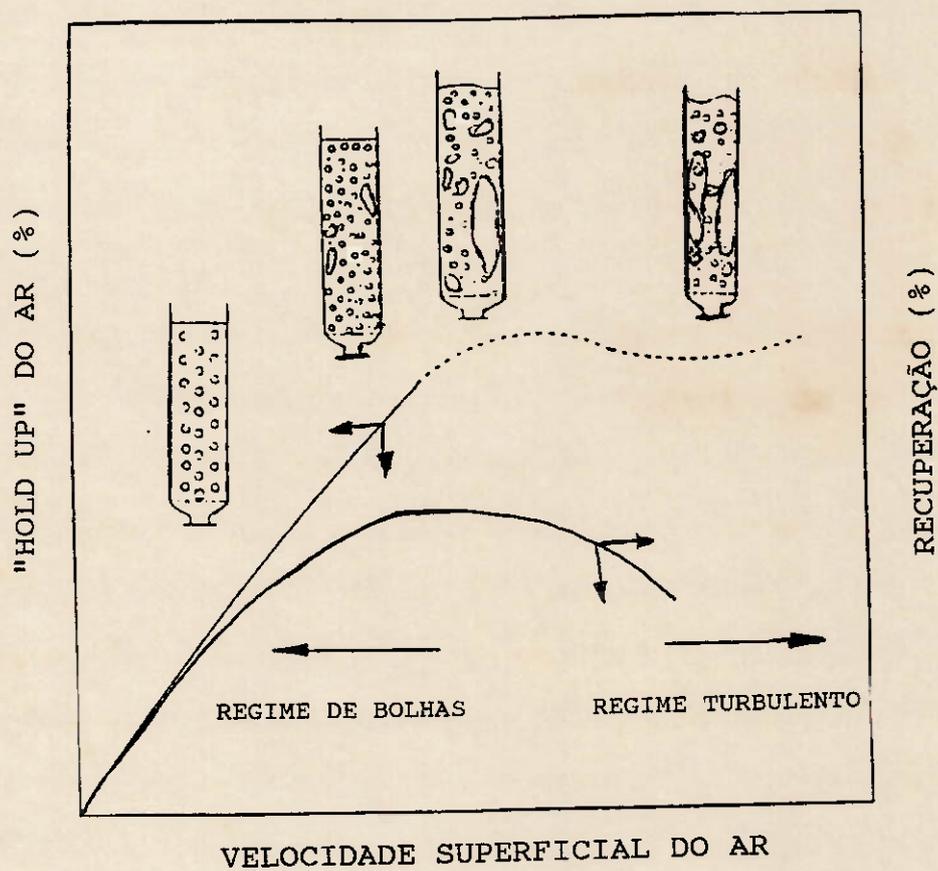


FIGURA 5.23 - INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE SUPERFICIAL DO AR [33]

TAMANHO DAS BOLHAS DE AR

O desempenho da coluna de flotação depende em grande parte do sistema de geração de bolhas. Um sistema de geração de bolhas é eficiente quando produz bolhas pequenas, com diâmetro de 0,5-1,5 mm [48]. A geração de bolhas muito pequenas, menores que 0,3 mm de diâmetro, provoca a diminuição da recuperação devido à perda da interface polpa-espuma [49].

Um dos problemas que a coluna de flotação encontrou no início de sua utilização foi a obtenção de aeradores eficientes. Foram testados vários tipos de sistemas principalmente de materiais porosos, tais como: chapas de aço, porcelana porosa, pano de filtro, borracha perfurada, teflon perfurado e outros. Estes sistemas tinham geralmente uma forma cilíndrica e eram colocados no interior da coluna. Os principais problemas que estes sistemas apresentavam eram a falta de confiabilidade da homogeneidade da geração das bolhas, escassez no controle do diâmetro das bolhas, entupimento, quebra do aerador e a impossibilidade de se retirar o aerador para inspeção com a coluna de flotação em operação.

Devido aos problemas acima mencionados foram feitos muitos esforços com o objetivo de se melhorar a geração de bolhas. O primeiro avanço significativo ocorreu com o desenvolvimento de um aerador de contato externo do ar pressurizado com água, e logo em seguida a introdução da mistura na coluna de flotação através de uma lança perfurada. Este sistema foi desenvolvido pela USBM [46]. Muitos avanços foram ocorrendo com o desenvolvimento de

materiais que fossem mais resistentes ao desgastes dos orifícios nas lanças, como por exemplo materiais cerâmicos, carbeto de tungstênio, etc.

Algumas opções de aeradores são produzidos pela Cominco, Minovex, Control International, etc. Estes sistemas apresentam possibilidade de controle da qualidade de geração das bolhas, bem como a inspeção sem ser necessária a parada do equipamento.

A adição de agentes tensoativos, como por exemplo espumantes, no sistemas de geração de ar promove a diminuição do diâmetro das bolhas geradas. Este fato é ilustrado na figura 5.24, onde é verificada diminuição sensível do diâmetro das bolhas pela adição do espumante Dowfroth 250C.

TAMANHO DAS PARTÍCULAS DOS MINERAIS

O diâmetro das partículas é uma das variáveis mais importantes no processo de flotação. Esta variável afeta diretamente a liberação e também o comportamento cinético e hidrodinâmico das partículas.

A flotação de partículas mais grossas diminui a recuperação pela ineficiência da liberação e pelo menor tempo de residência das partículas devido à ação gravitacional no transporte de sólidos na coluna de flotação. O tempo médio de residência de partículas grosseiras, acima de 100 μ m (0,1 mm), pode atingir 50% em relação ao da fase líquida.

Para partículas mais finas observa-se, além de um maior grau de liberação, uma tendência do tempo médio de residência estar bem próximo ao da fase líquida. Contudo, a

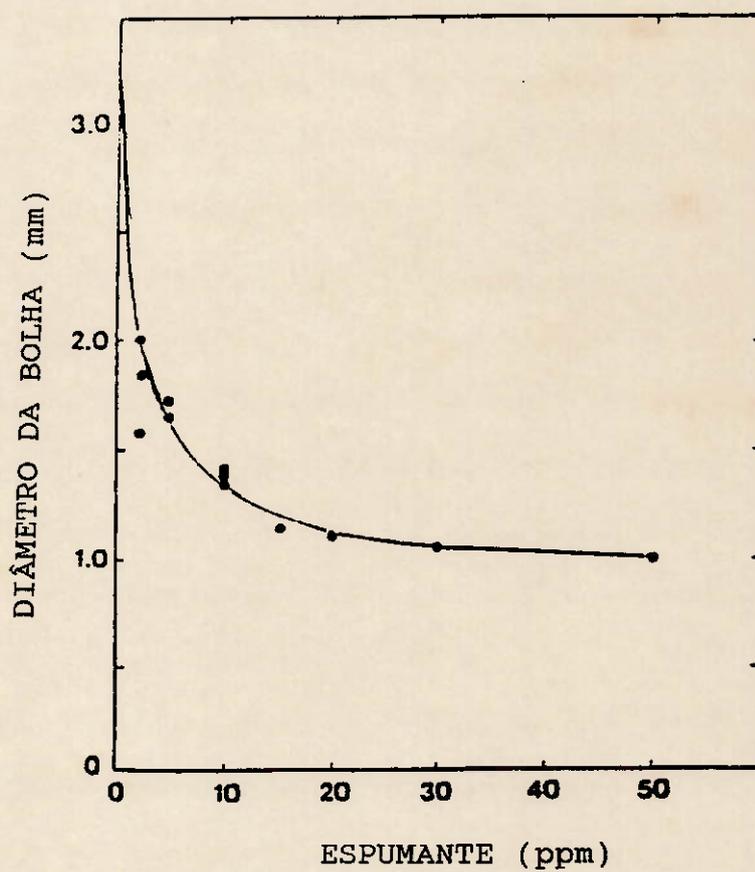


FIGURA 5.24 - INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE ESPUMANTE NO DIÂMETRO DAS BOLHAS DE AR [33]

flotação de partículas mais finas apresenta desvantagens como a necessidade de maior custo de moagem, arraste de partículas de ganga com conseqüente perda de seletividade, e menor eficiência de coleta podendo influenciar na recuperação do mineral [50]. Estas desvantagens são minimizadas na coluna de flotação pela diminuição do arraste de ganga pela presença de água de lavagem da espuma e aumento da recuperação de partículas finas pela maior eficiência do sistema de aeração.

Apesar da coluna de flotação apresentar vantagens bastante significativas para as partículas finas, não significa que este processo não possa ser aplicado satisfatoriamente à flotação de partículas mais grosseiras. Pelo contrário, a coluna de flotação apresenta cada vez mais aplicações para partículas mais grosseiras devido às suas vantagens de seletividade, recuperação, custo, etc..

A figura 5.25 mostra os dados de flotação "cleaner" de cobre em coluna de flotação. Nota-se que ocorre uma diminuição da recuperação nas partículas mais grosseiras e também nas partículas mais finas, tendência semelhante à observada na flotação em células mecânicas.

A escolha do grau de moagem e liberação das partículas tem que levar em consideração todos estes aspectos, sendo que a análise de custo e a qualidade do produto final definirão o processo.

ÁGUA DE LAVAGEM

Uma das grandes diferenças e inovações da coluna de flotação é a presença de água de lavagem, que corresponde à

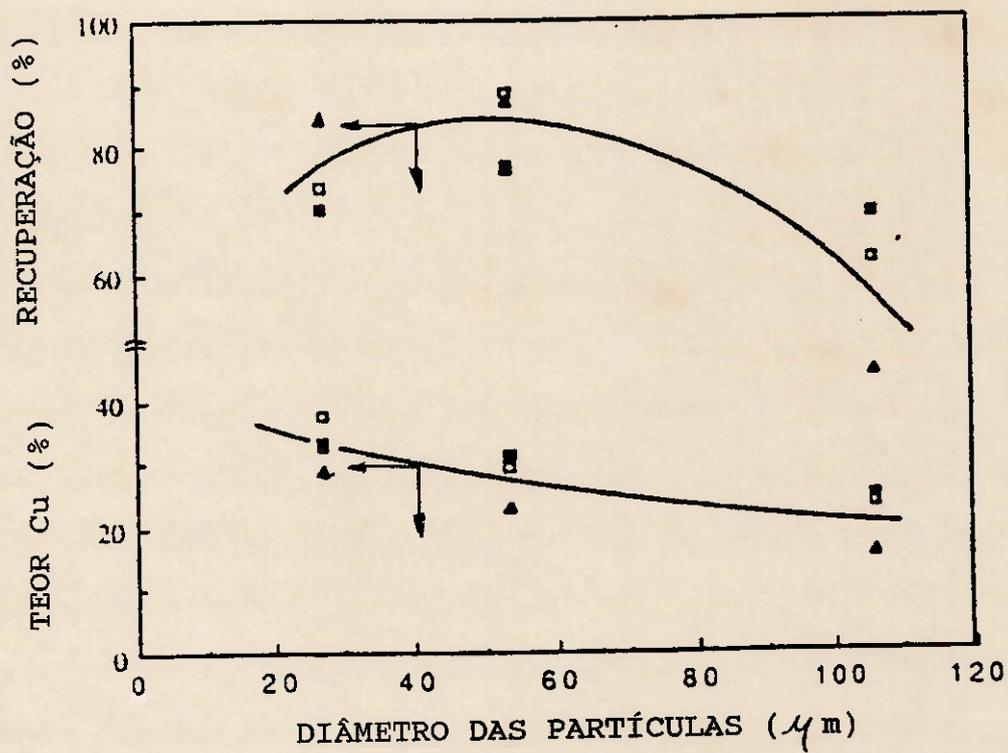


FIGURA 5.25 - EFEITO DO DIÂMETRO DAS PARTÍCULAS NA FLOTAÇÃO DE COBRE [46]

água introduzida na espuma do material flotado com o objetivo de ajuste do balanço do fluxo de material através da coluna e principalmente de remoção das partículas de ganga que foram arrastadas.

Devido à presença da água de lavagem a coluna de flotação tem possibilidade de aumentar a seletividade do processo sem perda de recuperação comparativamente às células mecânicas.

Nas células mecânicas a camada de espuma funciona como um filtro que rejeita as partículas arrastadas. Contudo os contaminantes mais finos não sofrem este efeito de drenagem devido ao pequeno tamanho da camada de espuma e sua baixa velocidade de sedimentação. A água contida na espuma das células mecânicas é a mesma que foi introduzida na alimentação auxiliando portanto o arraste. Já na coluna de flotação a maior parte da água contida na espuma é a água de lavagem e não a água introduzida com a alimentação.

DISTRIBUIÇÃO DA ÁGUA DE LAVAGEM

A eficiência da água de lavagem está diretamente relacionada com a sua distribuição. A água de lavagem deve ser distribuída de modo a abranger toda a seção da camada de espuma sem prejudicar o transbordo do concentrado.

Os distribuidores de água de lavagem podem ser classificados em externos e internos.

Os distribuidores externos facilitam a observação da distribuição da água de lavagem e reduzem o entupimento dos orifícios de distribuição por não estarem em contato com a polpa. São geralmente constituídos por um prato perfurado a

uma altura fixa do transbordo da espuma. Estes distribuidores possuem a tendência a maior consumo de água devido à dificuldade de atuação em toda a extensão da camada de espuma. É recomendado em casos de espumas frágeis.

Os distribuidores internos são geralmente instalados entre 10 e 20 cm abaixo do nível do transbordo. São do tipo multitubular com um ou dois níveis de distribuição. Geralmente apresentam sistemas móveis para facilitar a manutenção e a limpeza, já que apresentam maior propensão ao entupimento.

A figura 5.26 mostra esquematicamente os tipos básicos de distribuição da água de lavagem.

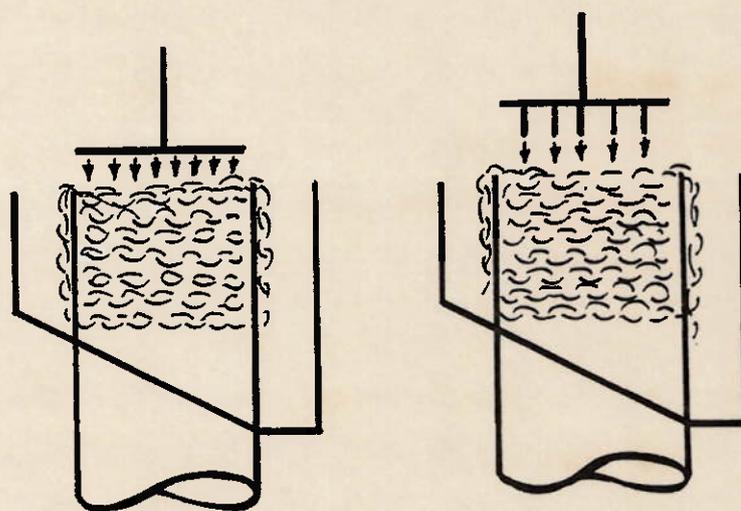
ALTURA DA CAMADA DE ESPUMA

A altura da camada de espuma é uma variável bastante eficaz na busca de maior seletividade no processo de flotação. As colunas de flotação geralmente trabalham com camadas de espumas que variam de 0,5 m a 1,0 m. Camadas maiores são usadas quando o processo requer alta seletividade entre as espécies hidrofóbicas e aquelas hidrofílicas [46].

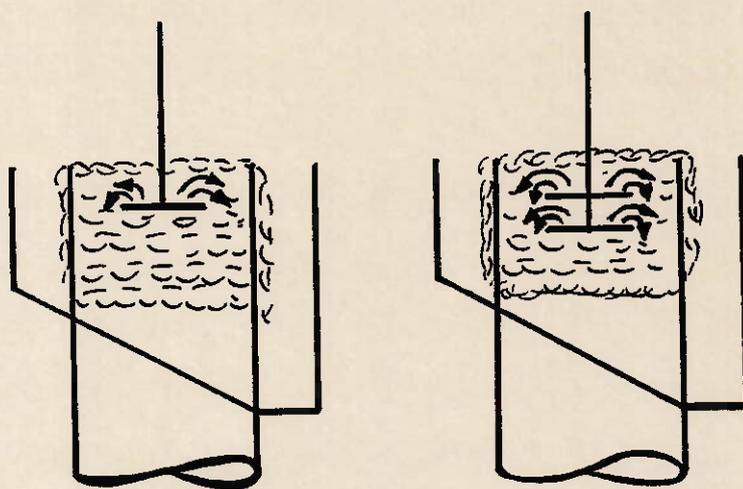
A altura da camada de espuma juntamente com a água de lavagem são duas variáveis de alta eficiência para a obtenção de maior seletividade.

INTERFACE POLPA-ESPUMA

A interface polpa-espuma deve situar-se acima do ponto de alimentação. A interface deve ser bem definida e manter-se o mais constante possível, caso contrário pode comprometer



EXTERNOS



INTERNOS

FIGURA 5.26 - DISTRIBUIDORES DA ÁGUA DE LAVAGEM

significativamente o processo de flotação em termos de recuperação e seletividade.

A perda da nitidez da interface pode ocorrer por vários motivos, tais como o excesso de reagentes coletores e espumantes, excesso de ar e descontrole na água de lavagem. O controle da relação das vazões de alimentação e rejeito, geralmente através da vazão de rejeito, é imprescindível ao bom funcionamento de uma coluna de flotação.

PORCENTAGEM DE SÓLIDOS DA POLPA ALIMENTADA

A coluna de flotação pode operar numa faixa bastante ampla de porcentagem de sólidos, de 15 a 50%, sem reduzir significativamente a seletividade, desde que se trabalhe com "bias" positivo.

Contudo, a utilização de porcentagens de sólidos baixas tem tendência a tornar mais seletivo o processo de flotação. Deve ser avaliada a influência da diminuição do tempo de residência provocada pela diluição da polpa, pois este pode comprometer a cinética do processo causando uma diminuição na recuperação.

UTILIZAÇÃO DE "BAFFLES" INTERNOS [51].

A utilização de colunas de flotação em escala industrial fez com que cada vez mais fossem construídas colunas com relação altura/diâmetro cada vez menor, já que não é possível uma proporcionalidade da escala piloto para industrial. Este fato é prejudicial à flotação pois aumenta a dispersão radial da polpa, fazendo com que o equipamento não opere em sua condição ideal, conseqüentemente ocorre

diminuição da recuperação. A relação altura/diâmetro tem limites físicos, sendo limitada a um máximo pela capacidade de transporte da polpa e a um mínimo pela diminuição do tempo de residência.

Uma solução para este problema consiste na utilização de divisões internas nas colunas de flotação. Estas divisões fazem com que colunas de grande capacidade tenham a altura no mínimo 10 vezes maior que o diâmetro no caso de seção circular, ou diâmetro equivalente no caso de colunas de seção quadrada e retangular. Geralmente as colunas apresentam divisões internas para que cada seção tenha diâmetro equivalente na faixa de 1,2-1,4 m, pois a altura da maioria das colunas de flotação situa-se entre 10-15 m. As divisões podem seccionar a coluna de flotação do topo ao fundo completamente, apresentar interrupções na região da alimentação e aeração ou situar-se somente entre o aerador e alimentação [52].

Estas divisões internas podem auxiliar na distribuição da alimentação da polpa e do ar.

DESCARGA DO REJEITO

A descarga do rejeito deve ser feita de modo a garantir a estabilidade da interface polpa-espuma frente às oscilações da vazão da água de lavagem e principalmente da alimentação, já que nem sempre esta última está sob controle da área de flotação.

Em colunas piloto e mesmo industriais de pequeno porte, o rejeito pode ser descarregado por ação de bombeamento. Contudo em colunas industriais de médio e grande porte

usam-se sistemas de válvulas que operam automaticamente, geralmente, para controle direto da altura da interface polpa-espuma.

CAPACIDADE DE CARREAMENTO

A capacidade de carreamento, "carrying capacity", de uma coluna de flotação é a razão entre a quantidade de concentrado produzido por unidade de área. Pode ser expressa em (g/min/cm²) ou em (t/h/m²) [46].

A capacidade de carreamento combinada com a cinética de flotação são parâmetros de grande importância no dimensionamento de uma coluna de flotação.

A capacidade de carreamento é influenciada diretamente pelo diâmetro da partícula e sua densidade. Em colunas de flotação em escala piloto o diâmetro da coluna também apresenta influência, pela ação do efeito de parede que dificulta a saída do concentrado.

A capacidade de carreamento deve ser sempre determinada experimentalmente, contudo existe uma equação proposta por Espinosa-Gomes e colaboradores a partir de observações da operação de colunas no Canadá, Austrália e Chile. Esta equação relaciona a capacidade de carreamento com o diâmetro das partículas e sua densidade [53]:

$$Ca = 0,0682 d_{80} \rho_p \quad \text{eq. 5.8}$$

onde:

Ca = capacidade de carreamento em g/min/cm²,

d_{80} = diâmetro, em μm , da malha que deixa passar
80% do concentrado,

ρ_p = densidade das partículas em g/cm^3

Esta correlação linear entre C_a e o produto $(d_{80} \cdot \rho_p)$ é mostrada na figura 5.27.

"LIP LOADING"

A capacidade de transporte do concentrado por unidade de área é expressa por (g/min/cm) ou (t/h/m) . A unidade linear, cm ou m , corresponde ao perímetro de transbordo do concentrado [53].

À medida que aumentamos a seção transversal de uma coluna de flotação não ocorre aumento na mesma proporção da borda de transbordo. Para amenizar esta situação são utilizadas calhas internas com bastante frequência. Estas calhas internas podem ou não acompanhar as divisões internas já comentadas anteriormente.

TEMPO MÉDIO DE RESIDÊNCIA

O tempo médio de residência da polpa é um parâmetro de informação limitada numa coluna de flotação. Isto se deve primeiramente ao fato da necessidade de definirmos qual fluxo está sendo analisado: rejeito, concentrado ou interface polpa-espuma. Cada um destes fluxos apresenta uma curva peculiar de distribuição do tempo de residência que é mostrada na figura 5.28.

A distribuição do tempo de residência para a zona de recuperação se enquadra perfeitamente no modelo de

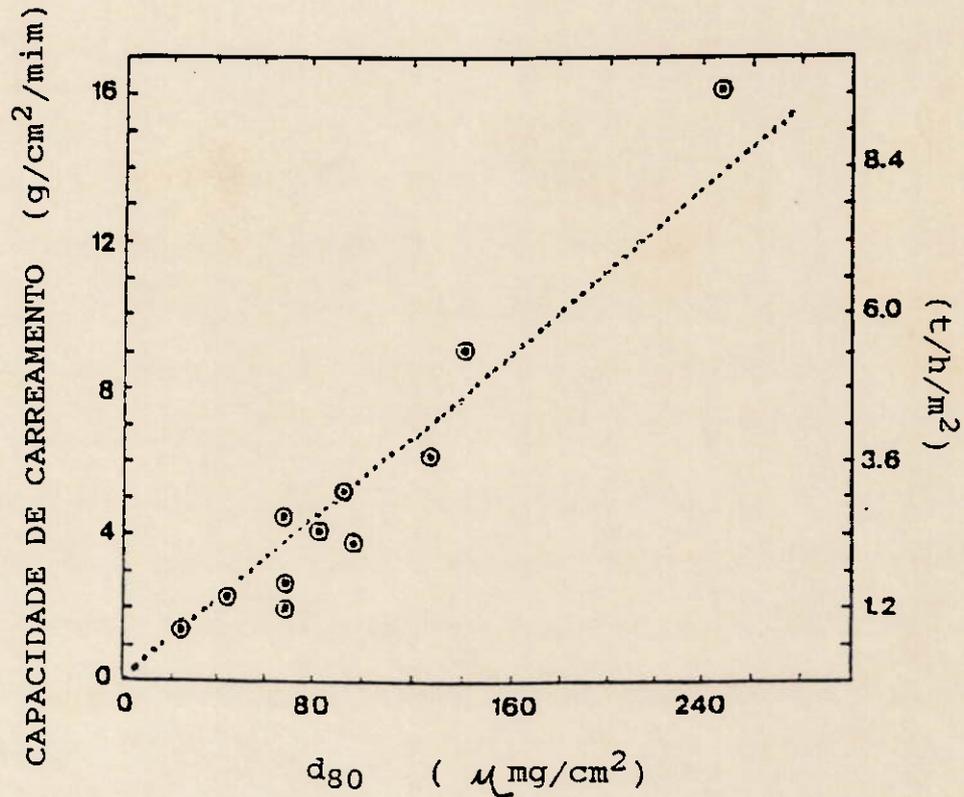
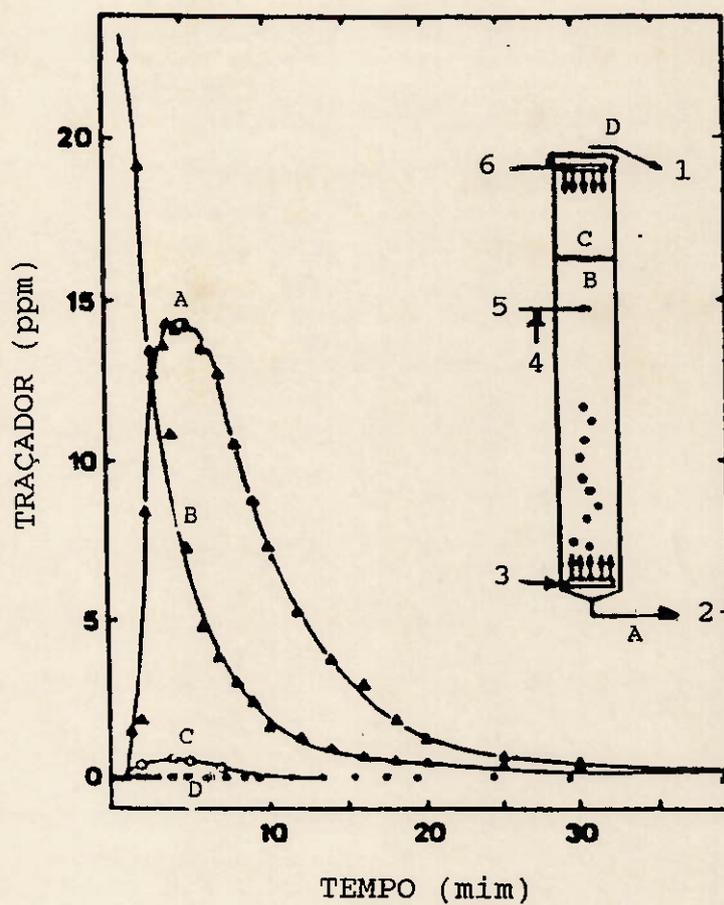


FIGURA 5.27 - CAPACIDADE DE CARREAMENTO EM FUNÇÃO DO PRODUTO DO TAMANHO DAS PARTÍCULAS PELA DENSIDADE [33]



- 1 . CONCENTRADO
- 2 . REJEITO
- 3 . AR
- 4 . TRAÇADOR
- 5 . ALIMENTAÇÃO
- 6 . ÁGUA DE LAVAGEM

FIGURA 5.28 - CONCENTRAÇÃO DO TRAÇADOR EM FUNÇÃO DO TEMPO
EM COLUNA INDUSTRIAL [33]

dispersão de reatores em regime tubular conforme foi verificado por Dobby e Finch em 1985. Esta análise está representada na figura 5.29 para colunas de 0,45 e 0,90 m de diâmetro [54].

Esta curva é resultado dos aspectos hidrodinâmicos de transferência de fluxo bem como do diâmetro das partículas [55]. As partículas mais finas apresentam distribuição do tempo de residência bastante similar à da água. As partículas mais grosseiras apresentam tempo médio de residência bastante inferior devido à sua maior velocidade de sedimentação [56].

NÚMERO DE DISPERSÃO

A dispersão axial da polpa, conforme já comentado anteriormente, faz com que a coluna de flotação não apresente comportamento ideal de reator em regime tubular. A fuga desta idealidade influencia na distribuição do tempo de residência das partículas, conseqüentemente na cinética do processo.

Pelo fato de desviar-se de um reator tubular ideal, a coluna de flotação é modelada pelas equações de reator tubular com dispersão. Devido a este fato, o número de dispersão passa a ter um papel de grande importância para verificarmos o comportamento da polpa dentro do equipamento.

O número de dispersão (N_d) é o parâmetro com o qual é possível verificar a influência de muitas variáveis no comportamento hidrodinâmico da coluna de flotação: relação diâmetro equivalente/altura, velocidade do ar, "hold up",

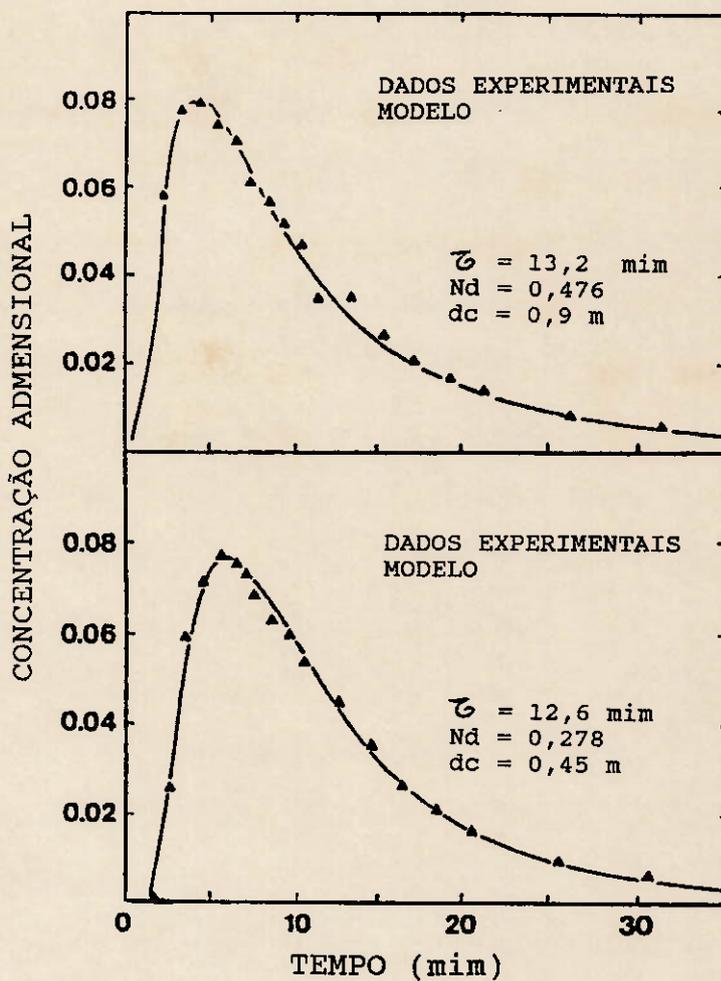


FIGURA 5.29 - AJUSTE DA DTR AO MODELO DE DISPERSÃO DE REATOR EM REGIME TUBULAR [33]

velocidade da polpa, número de Reynolds, viscosidade da polpa e densidade das partículas.

GEOMETRIA DA COLUNA DE FLOTAÇÃO

A coluna de flotação pode ter seção circular, quadrada ou retangular. A seção circular requer menor espessura da chapa de construção, barateando portanto o investimento. Como não se dispõe de antecedentes que comprovem que colunas de flotação de seção quadrada apresentam pior desempenho, estas têm sido usadas devido a algumas vantagens. Uma seção quadrada possui vantagens no arranjo dos equipamentos na área, facilita a homogeneidade da alimentação através de distribuidores externos, os aeradores podem ser todos de mesmo tamanho e facilita a expansão da instalação em módulos.

SISTEMA DE INSTRUMENTAÇÃO E CONTROLE

O controle pode ser convenientemente dividido em duas categorias:

- . controle para estabilização da operação da instalação,
- . controle para a otimização do processo.

Para avaliar qualquer proposta de controle de um processo é necessário primeiramente que se conheça a matriz do processo, ou seja, a resposta da variável controlada pela variação da variável manipulada. A matriz do processo para coluna segundo Dobby [33], é mostrada na tabela 5.5, onde cada variável manipulada é variada isoladamente.

TABELA 5.5 - MATRIZ DO PROCESSO PARA COLUNA DE
FLOTAÇÃO [33]

VARIÁVEL MANIPULADA	VARIÁVEL CONTROLADA						
	Nível	Camada	Bias	%Sól.	Hold up	Teor	Recup.
Água de Lavagem	+ L	- L	+ R	- M	+ L	+ - R	- + L
Vazão de Rejeito	- R	+ R	+ R		+ M	+ L	- L
Vazão de Ar	+(-) R	-(+) R	- L	- L	+ - R	- M	+ - M
Dosagem de Espumante	+ - L	- + L	- L	- L	+ M	- L	+ L
Taxa de Alimentação	+ R	- R	- R	+ L	+ L	+ L	- L

OBS: . + : aumento da variável controlada pelo aumento da variável manipulada
 . - : diminuição da variável controlada pela diminuição da variável manipulada
 . L : resposta lenta
 . R : resposta rápida
 . M : tempo de resposta moderado
 . () : resposta em estado estacionário pode ser diferente da resposta em processo dinâmico

Nesta tabela as variáveis manipuladas são:

- . água de lavagem,
- . vazão de rejeito,
- . vazão de ar,
- . dosagem de espumante,
- . taxa de alimentação.

As variáveis controladas são:

- . nível,
- . altura da camada de espuma,
- . "bias",
- . porcentagem de sólidos no concentrado,
- . "hold up",
- . teor do concentrado,
- . recuperação do mineral de interesse.

O controle para estabilização do sistema pode ser feito de duas maneiras:

- . controle do nível,
- . controle do nível e do "bias".

O controle do nível é o mais simples e barato. O nível é controlado pela vazão do rejeito e a água de lavagem é ajustada a um "set point" pré-determinado [57].

Na segunda opção o nível é controlado pela adição da água de lavagem, enquanto que o rejeito é controlado pela

diferença do fluxo de alimentação e do próprio rejeito, sendo usado o "bias" como "set point". Este controle é mais sofisticado, mais caro e geralmente possui resposta mais lenta.

Estas duas opções de controle são mostrada na figura 5.30. Outras opções de controle podem ser utilizadas, como por exemplo o controle do "bias" pelo balanço de massa ou pela água de lavagem, conforme mostrado na figura 5.31 [58].

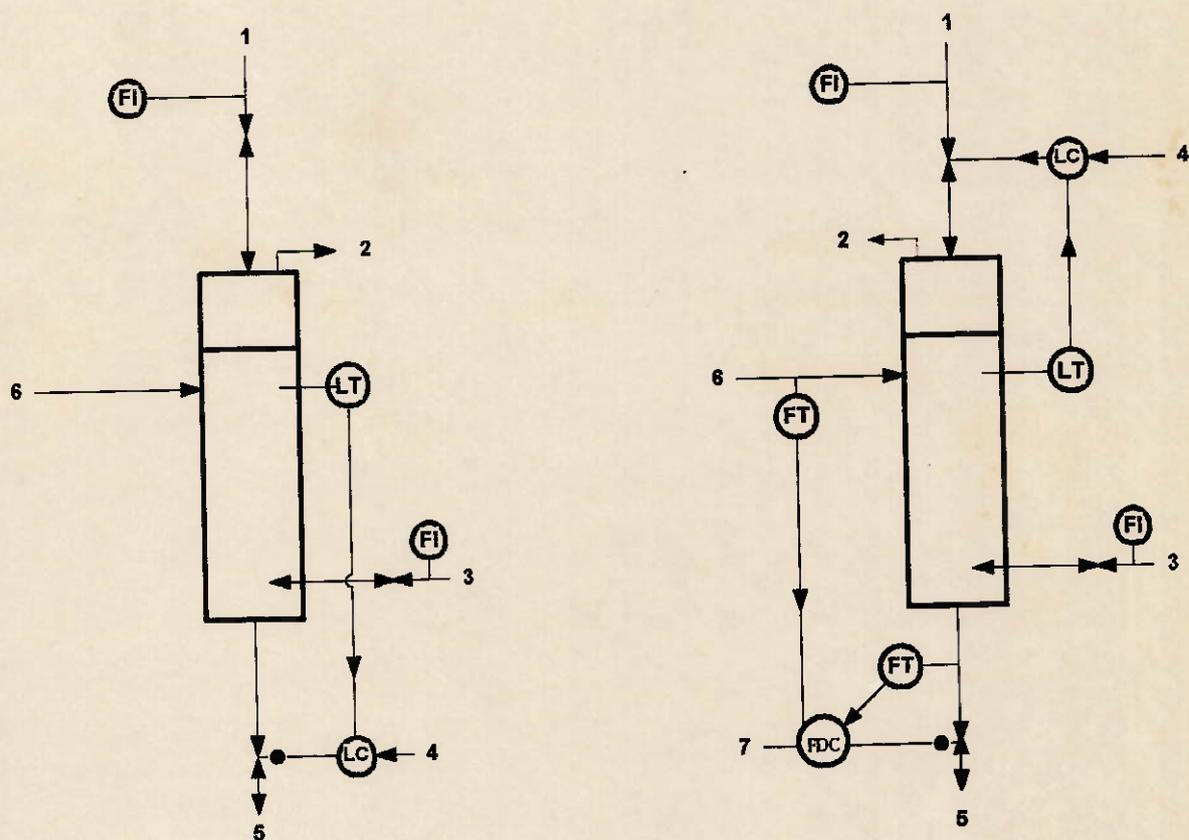
A estratégia de controle para otimização do processo é feita pela manipulação da água de lavagem e da vazão de ar para controlar o teor e a recuperação.

O entendimento desta grande diversidade de variáveis da coluna de flotação é requisito necessário para o sucesso de sua implantação num processo de concentração.

5.3.3.3 Vantagens operacionais e econômicas

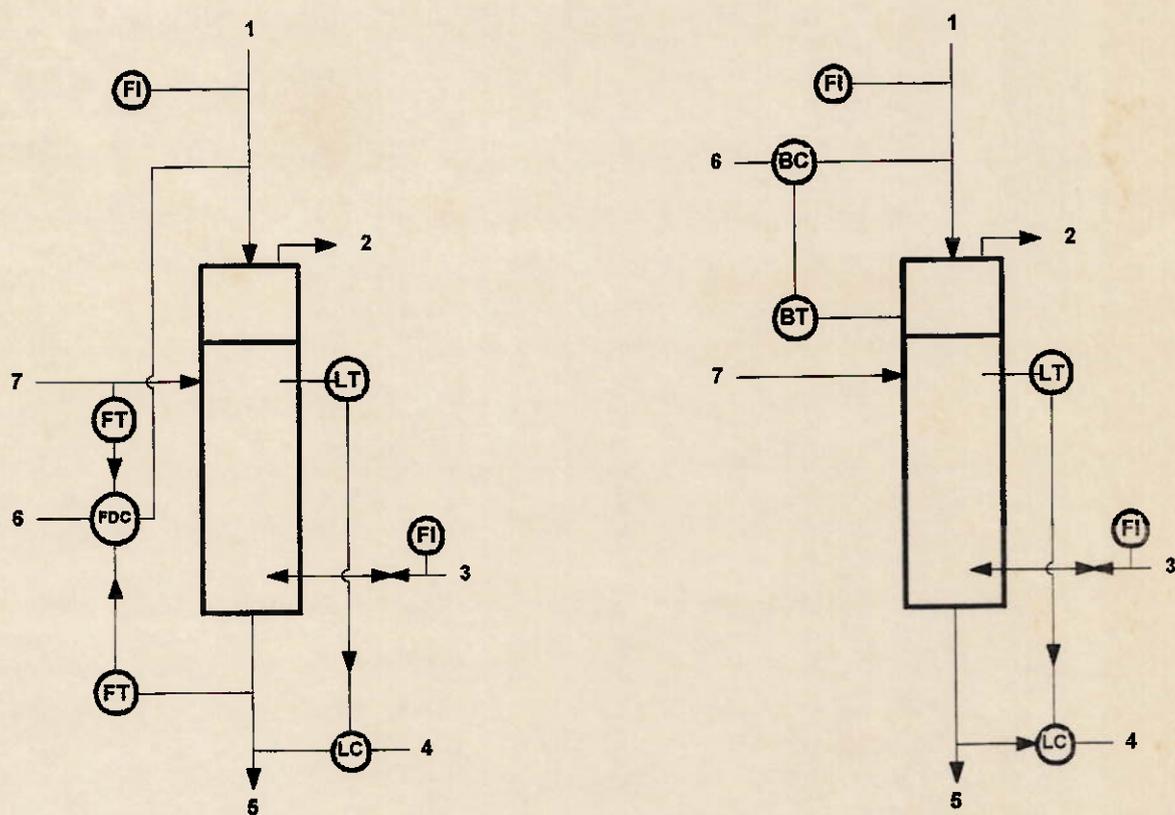
A coluna de flotação apresenta inúmeras vantagens comparativamente às células convencionais [59]:

- . aumento de recuperação das partículas finas e grosseiras através da presença de pequenas bolhas de ar com dimensões controladas, fluxo contracorrente que garante uma maior probabilidade de adesão partícula/bolha e condições hidrodinâmicas adequadas ao processo de flotação na zona de recuperação,



1. ÁGUA DE LAVAGEM
2. CONCENTRADO
3. AR
4. "SET POINT" DO NÍVEL
5. REJEITO
6. ALIMENTAÇÃO
7. "SET POINT" DO "BIAS"

FIGURA 5.30 - CONTROLES PARA ESTABILIZAÇÃO DA FLOTAÇÃO EM COLUNA [33]



1. ÁGUA DE LAVAGEM
2. CONCENTRADO
3. AR
4. "SET POINT" DO NÍVEL
5. REJEITO
6. "SET POINT" DO "BIAS"
7. ALIMENTAÇÃO

FIGURA 5.31 - ALTERNATIVAS DE CONTROLE PARA ESTABILIZAÇÃO DA FLOTAÇÃO EM COLUNA [33]

- . aumento da seletividade através da diminuição do arraste de materiais de ganga garantida pelo controle da altura da camada de espuma e da presença da água de lavagem,
- . possibilidade de projeto, fabricação e operação de unidades de grande porte,
- . confiabilidade nas equações de dimensionamento,
- . possibilidade de substituição de bancos completos de células mecânicas por uma coluna de flotação devido ao seu maior rendimento metalúrgico [60],
- . diminuição do custo de fabricação devido a sua simplicidade construtiva,
- . necessidade de espaço reduzida por ser uma unidade predominantemente vertical,
- . diminuição dos custos de manutenção devido principalmente à ausência de partes móveis,
- . simplicidade e baixo custo de instrumentação e controle,
- . minimização de custos com operadores pela possibilidade de controle centralizado,
- . redução do consumo de energia,
- . diminuição de peças de reposição,
- . maior entendimento do fenômeno da flotação possibilitando melhor atuação da área de processo na busca da otimização da instalação [61],
- . aplicações na indústria química na recuperação de produtos orgânicos e no tratamento de efluentes [62].

A coluna de flotação apresenta no entanto algumas desvantagens [61]:

- . baixa área específica de superfície livre para transbordo do concentrado comparativamente a células mecânicas de mesmo volume, conforme mostrado na tabela 5.6,
- . menor valor de borda para transbordo do concentrado principalmente quando comparamos um circuito de células mecânicas com uma coluna somente; este efeito é minimizado pela possibilidade de instalação de calhas internas [63].

Estas desvantagens apresentadas não comprometem a utilização de colunas de flotação, sendo pois necessário o seu conhecimento para que sejam tomadas providências para o seu controle.

5.4 Modelamento matemático de reatores químicos

Um dos grandes desafios da engenharia consiste no dimensionamento adequado de um reator químico, levando-se em consideração os aspectos físico-químicos do processo, bem como a operacionalidade do equipamento e seu desempenho.

No projeto de um reator são necessárias informações e experiências de diversas áreas do conhecimento [64]:

- . termodinâmica,
- . cinética química,
- . mecânica dos fluidos,
- . transferência de calor,
- . transferência de massa,

**TABELA 5.6 COMPARAÇÃO DA ÁREA SUPERFICIAL ESPECÍFICA ENTRE
CÉLULAS MECÂNICAS E COLUNA DE FLOTAÇÃO [61]**

MÁQUINA DE FLOTAÇÃO	VOLUME (m ³)	ÁREA SUPERFICIAL (m ²)	ÁREA ESPECÍFICA (m ² /m ³)
DENVER D-R (n ^o 1275)	36,1	14,7	0,41
O.K. 38U	38,0	12,5	0,33
AKER FM-40	40,0	14,1	0,35
AGITAIR (165 AX 1500)	42,5	15,4	0,36
SALA (AS4-44)	44,0	24,2	0,55
WENCO (225)	85,0	32,5	0,38
COLUNA 180 cm (CANADÁ)	40,8	3,3	0,08
COMINCO (ARAFÉRTIL)	196,0	13,5	0,07

- . resistência dos materiais,
- . aspectos econômicos, etc..

O projeto de um reator envolve questões que dizem respeito aos aspectos termodinâmicos e cinéticos de uma reação química. A termodinâmica pode fornecer subsídios às questões que envolvem a espontaneidade do fenômeno, seu rendimento, reações paralelas, etc. A cinética química, de um modo geral, procura caracterizar e analisar os fatores que influenciam a velocidade de um fenômeno químico.

Os aspectos termodinâmicos e cinéticos ocorrem dentro do reator, onde passa a ter grande importância a distribuição do tempo de residência, como um parâmetro para distinguir o tipo de reator em questão, influenciando diretamente na sua eficiência.

Ao encararmos a flotação como um fenômeno físico-químico, temos claramente a importância de avaliarmos os tipos clássicos de reatores, enfocando suas principais características e equações básicas. Utilizando estes conceitos podemos entender melhor as equações de dimensionamento de uma coluna de flotação.

A coluna de flotação, portanto, corresponde a um reator onde ocorre o fenômeno de concentração de um determinado mineral. Na separação de barita em minério fosfatado, o rendimento do processo pode ser analisado como sendo a recuperação de barita no flotado.

5.4.1 Definição de velocidade de uma reação química

Para definirmos a velocidade de um fenômeno químico, primeiramente vamos considerar o componente de interesse com o índice i , sendo:

- . N_i : número de moles do componente i ,
- . V : volume reacional,
- . t : tempo.

A velocidade de um fenômeno corresponde à transformação do número de moles do componente i no tempo, daí temos a seguinte equação em forma diferencial [64]:

$$r_i = \frac{1}{V} \frac{dN_i}{dt} \quad \text{eq. 5.9}$$

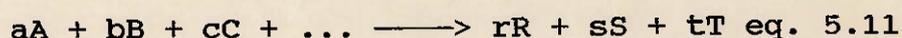
onde r_i corresponde à taxa de transformação do componente i , em número de moles por unidade de volume no tempo, ou seja, a velocidade do fenômeno em questão.

Definindo a concentração C_i como o número de moles do componente i no volume V e substituindo na equação 5.9 temos:

$$-r_i = - \frac{dC_i}{dt} \quad \text{eq. 5.10}$$

O sinal negativo é utilizado quando a concentração do componente i diminui com o tempo.

A equação abaixo representa uma reação elementar ou a etapa lenta de um fenômeno químico.



A equação da velocidade pode ser expressa da seguinte forma:

$$-r_i = k C_A^n C_B^m C_C^o \dots \quad \text{eq. 5.12}$$

A velocidade de uma reação é diretamente proporcional ao produto das concentrações dos reagentes, elevado a coeficientes.

Para uma reação com somente um reagente, tem-se:

$$-r_i = k C_A^n \quad \text{eq. 5.13}$$

Para obtermos o valor de n , que corresponde à ordem do fenômeno em relação ao componente A, são necessários ensaios laboratoriais ou estimativas de acordo com a experiência em fenômenos similares.

A partir de dados experimentais podemos determinar a ordem do fenômeno por 2 métodos matemáticos clássicos:

- . determinação de n por regressão da equação 5.13 linearizada,

. admitir um valor para n e avaliar a concordância com a linearização da equação.

As taxas de reação não-elementares são estudadas considerando-se que uma reação simples é, na realidade, o efeito global de uma seqüência de reações elementares. Neste caso é necessário obter-se uma equação matemática que descreva com precisão necessária os dados em estudo.

Geralmente os fenômenos de flotação apresentam cinética de primeira ordem em relação ao elemento em questão e ordem zero em relação aos outros elementos presentes no minério [65].

Considerando-se uma reação de primeira ordem, $n = 1$ e utilizando-se as equações 5.10 e 5.13, tem-se [66]:

$$\begin{aligned}
 -r_A &= kC_A^n \\
 -r_A &= kC_A^1 \\
 -\frac{dC_A}{dt} &= kC_A \\
 -\frac{dC_A}{C_A} &= kdt \\
 \int_{C_{A0}}^{C_A} \frac{dC_A}{C_A} &= -k \int_0^t dt \\
 \ln \frac{C_A}{C_{A0}} &= -kt \\
 \frac{C_A}{C_{A0}} &= e^{-kt}
 \end{aligned}
 \tag{eq. 5.14}$$

Introduzindo-se o conceito de rendimento (R), temos:

$$R = \frac{\text{quantidade transformada}}{\text{quantidade total inicial}}$$

$$R = \frac{C_{A0} - C_A}{C_{A0}} = 1 - \frac{C_A}{C_{A0}} \quad \text{eq 5.15}$$

Substituindo-se a equação 5.15 na equação 5.14 e fazendo-se simplificações e acrescentando-se R_{00} com o objetivo de mudança de escala e normalização dos ensaios, temos:

$$\frac{R}{R_{00}} = 1 - e^{-kt} \quad \text{eq 5.16}$$

Para avaliação da validade desta equação para os fenômenos de flotação, basta linearizar a equação 5.16 e verificar a concordância dos dados experimentais com a equação proposta.

5.4.2 Análise individual de reatores ideais

Os reatores ideais são: reator descontínuo ("batch reactor"), reator em regime tubular ("plug flow reactor" - PFR) e o reator de mistura perfeita ("constant flow stirred tank reactor" - CFSTR) [67].

As características principais bem como o modelamento matemático destes reatores são discutidos a seguir.

5.4.2.1 Reator descontínuo

O reator descontínuo é caracterizado pela operação em estado não-estacionário, ou seja, a composição da mistura reacional varia com o tempo.

Contudo, num instante qualquer a composição ao longo de todo o reator é a mesma, devido à presença de mistura perfeita no sistema.

Podemos estabelecer que a velocidade de transformação de um componente é igual à velocidade de acúmulo deste no reator. A velocidade de transformação de um componente é representada por $-r_A V$, onde $-r_A$ é a velocidade de transformação do componente A dentro do reator (moles/(tempo x volume)) e V corresponde ao volume do reator ocupado pela mistura reagente.

Em termos de equações diferenciais temos [64]:

$$\begin{aligned} -r_A V &= \frac{dN_A}{dt} = \frac{d[N_{A0}(1-R)]}{dt} \\ -r_A V &= N_{A0} \frac{d(1-R)}{dt} \end{aligned} \quad \text{eq 5.17}$$

Resolvendo a equação 5.17 em termos de t, temos:

$$t = -N_{A0} \int_0^R \frac{dR}{-r_A} \quad \text{eq 5.18}$$

Pela equação 5.18 podemos calcular o tempo de reação para que tenhamos um rendimento R da reação. Para isto basta calcularmos a área abaixo da curva $(-1/r_A) = f(R)$, obtida a partir de dados experimentais do avanço do processo em função do tempo.

As transformações em reatores descontínuos são bastante aplicadas em sistemas que trabalham com pouca quantidade de material, volumes pequenos, podendo-se obter um bom controle do processo. Os reatores descontínuos, em geral,

são mais simples que os reatores contínuos, sendo muito utilizados em escala de laboratório para execução de ensaios cinéticos.

Como exemplo de aplicação de reator descontínuo temos a preparação do coletor de barita, que é realizada pelo aquecimento do reagente em um tanque agitado, num tempo pré-determinado. Os ensaios em escala de laboratório que definiram o processo de preparação do CESS serão avaliados no item 5.4.2.

A flotação em escala bancada, em células de flotação "batch", se aproxima deste sistema, contudo ocorre saída de produto, o que não é previsto no sistema ideal.

5.4.2.2 Reator em regime tubular ("plug flow reactor")

O primeiro dos dois reatores de fluxo contínuo ideal é conhecido como de fluxo pistonado ("plug flow"), fluxo tubular ("tubular flow"), fluxo em camadas ou reator de fluxo contínuo sem mistura ("unmixed flow reactor"). Aqui, será tratado pelo nome de reator tubular.

O reator tubular é caracterizado por apresentar um escoamento ordenado dos elementos de fluido. Neste tipo de reator não há difusão ao longo do percurso e nem diferença de velocidade entre dois elementos quaisquer do fluido. O sistema funciona como se os componentes caminhassem numa fila única ao longo do reator. Conseqüentemente o tempo de residência é o mesmo para todos os componentes, não ocorre curto-circuito. O sistema não apresenta dispersão axial.

Analisando-se um elemento de volume dV , conforme mostrado na figura 5.32, temos [64]:

$$\text{entrada} = \text{saída} + \text{consumo} \quad \text{eq. 5.19}$$

Fazendo-se o balanço de massa em termos de moles por tempo, temos:

$$\begin{aligned} \text{entrada (moles/tempo)} &= F_A \\ \text{saída (moles/tempo)} &= F_A + dF_A \\ \text{consumo (moles/tempo)} &= (-r_A)dV \end{aligned}$$

Substituindo-se os termos acima na equação 5.19 e fazendo as simplificações temos:

$$\frac{V}{F_{A0}} = \int_0^{R_A} \frac{dR}{-r_A} \quad \text{eq. 5.20}$$

Substituindo o primeiro membro da equação 5.20 para unidade de tempo por análise dimensional, tem-se:

$$\frac{V}{F_{A0}} = \frac{\tau}{C_{A0}} = \int_0^{R_A} \frac{dR}{-r_A} \quad \text{eq. 5.21}$$

Pela equação 5.21 podemos calcular o tempo de residência ou o volume do reator necessário a um determinado rendimento do fenômeno. Para isto basta calcularmos a área abaixo da curva $(-C_{A0}/r_A) = f(R)$ ou $(-F_A/r_A) = f(R)$ respectivamente. Os dados para a construção das curvas são obtidas a partir de experimentos, onde é avaliado o rendimento do processo em função do tempo (ensaios cinéticos).

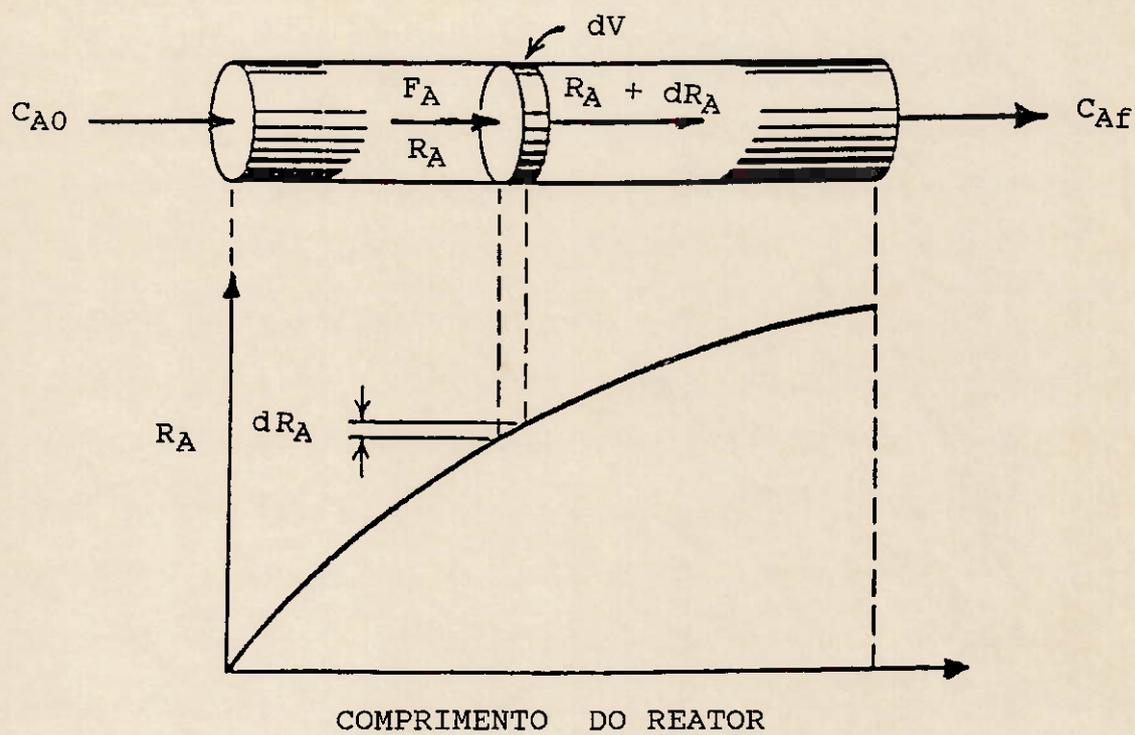


FIGURA 5.32 - BALANÇO DE MASSA NO REATOR TUBULAR [64]

Os reatores tubulares ideais apresentam aplicações mais restritas devido á complexidade de sua construção. A coluna de flotação pode ser considerada um reator tubular não ideal. A fuga da idealidade ocorre principalmente devido à dispersão axial que a polpa apresenta dentro do equipamento.

5.4.2.3 Reator de mistura perfeita ("constant flow stirred tank reactor")

O outro reator contínuo é o reator de mistura ("backmixed reactor", "backmix reactor"), reator com agitação ou CFSTR ("constant flow stirred tank reactor"). Como seu próprio nome indica, trata-se de um reator em que todo o conteúdo é agitado, mantendo a sua composição constante ao longo do reator. Devido a esta mistura perfeita, a composição na saída do reator é igual a de seu interior.

Analisando-se o sistema da figura 5.33, tem-se o seguinte balanço de material [64]:

$$\text{entrada} = \text{saída} + \text{consumo} \qquad \text{eq. 5.22}$$

Fazendo-se o balanço de massa em termos de moles por tempo, temos:

$$\begin{aligned} \text{entrada (moles/tempo)} &= F_{A0} \\ \text{saída (moles/tempo)} &= F_{A0}(1-R) \\ \text{consumo (moles/tempo)} &= (-r_A)V \end{aligned}$$

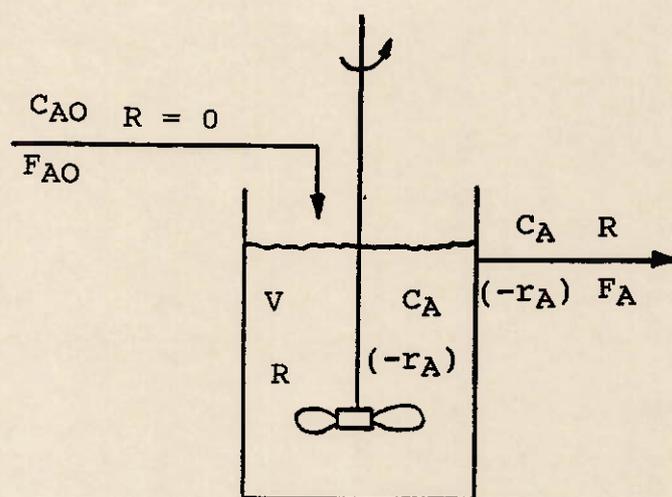


FIGURA 5.33 - BALANÇO DE MASSA NO REATOR DE MISTURA [64]

Substituindo-se os termos acima na equação 5.22 e fazendo-se as simplificações temos:

$$\frac{V}{F_{A0}} = \frac{R}{-r_A} \quad \text{eq. 5.23}$$

Substituindo o primeiro membro da equação 5.23 para unidade de tempo por análise dimensional, tem-se:

$$\frac{V}{F_{A0}} = \frac{G}{C_{A0}} = \frac{R}{-r_A} \quad \text{eq. 5.24}$$

Pela equação 2.24 podemos calcular o tempo de reação ou o volume do reator para um determinado rendimento do fenômeno. Os dados para a construção das curvas são obtidos a partir de experimentos, onde é avaliado o rendimento do processo em função do tempo (ensaios cinéticos).

Uma aplicação muito comum é o circuito de reatores de mistura em série, onde o produto de um reator corresponde à alimentação do segundo reator e assim sucessivamente. Este tipo de arranjo leva a um volume reacional menor para um mesmo rendimento do fenômeno.

O conceito de reatores de mistura pode ser aplicado em circuitos de flotação tanto na preparação dos reagentes em processo contínuo, como também no condicionamento da polpa com os reagentes. Deve sempre ser avaliada a utilização de reatores em série devido aos seus benefícios em termos de volumes menores.

5.4.2.4 Comparação entre os reatores

Analisando-se as características dos reatores descritos bem como as equações que os representam, podemos concluir que:

- . o tempo de residência necessário para que um fenômeno químico ocorra num reator tubular é o mesmo tempo de um reator descontínuo (batelada),
- . o tempo necessário para que um fenômeno químico ocorra num reator de mistura é maior que o tempo de residência de um reator tubular,
- . a utilização de reatores de mistura em série faz com que o tempo total do sistema seja menor que quando se utiliza somente um reator de mistura,
- . um circuito com o número de reatores de mistura em série tendendo ao infinito leva a um tempo mínimo, ou seja, o tempo do reator tubular,
- . o tempo do reator descontínuo, que é o mesmo de um reator tubular, é o menor tempo possível para que ocorra um dado fenômeno no rendimento pré-definido,
- . para um mesmo tempo reacional total, um reator multicompartimentado proporciona melhor desempenho que somente um reator de mistura.

As conclusões mostradas acima foram avaliadas em termos de tempo, podendo também ser válidas em termos de volume. Em sistemas contínuos podemos facilmente converter tempo em volume, através da vazão dos componentes em estudo.

A tabela 5.7 resume as equações e os gráficos dos reatores ideais.

Para analisarmos um caso específico de reatores de mistura em série, consideremos uma reação de primeira ordem ocorrendo em um reator de mistura, em dois reatores de mistura em série até um número infinito de reatores em série. À medida que aumentamos o número de reatores diminuimos o volume necessário, até atingirmos o volume mínimo do reator tubular que é o mesmo volume do reator descontínuo. A tabela 5.8 mostra que para 95% de eficiência do processo, o reator de mistura necessita um volume 6 vezes maior que o reator tubular. Utilizando-se este raciocínio para flotação em coluna nota-se claramente a sua maior eficiência em relação a uma célula mecânica. Isto ocorre devido ao fato da coluna de flotação ser um reator tubular, apesar de não ser ideal, enquanto a célula mecânica se aproxima de um reator de mistura.

Esta discrepância enorme de volumes entre reatores de mistura e reatores tubulares é proveniente da distribuição do tempo de residência nestes sistemas. Um reator de mistura apresenta aproximadamente 37% de seu volume com tempo de permanência no reator menor que um dado tempo de residência, ocorrendo portanto grande curto-circuito dos componentes. Este valor vai diminuindo à medida que o sistema caminha para reatores em série, até reatores tubulares. Em reatores tubulares ideais o curto-circuito é nulo.

A figura 5.34 mostra a comparação da distribuição dos tempos de residência dos reatores. Para um dado tempo de

TABELA 5.7 - RESUMO DAS EQUAÇÕES E GRÁFICOS DOS REATORES IDEAIS

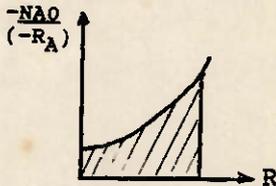
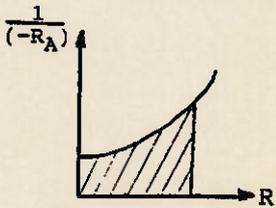
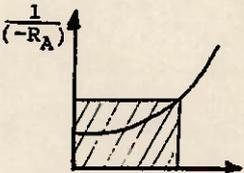
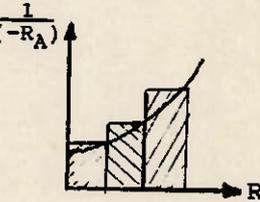
REATOR	EQUAÇÕES	GRÁFICOS
DESCONTÍNUO	$t = -N_{A0} \int_0^R \frac{dR}{(-r_A)}$	 <p>ÁREA = t</p>
TUBULAR	$\tau = C_{A0} \int_0^R \frac{dR}{(-r_A)}$ $V = F_{A0} \int_0^R \frac{dR}{(-r_A)}$	 <p>ÁREA = $\frac{\tau}{C_{A0}} = \frac{V}{F_{A0}}$</p>
MISTURA	$\tau = C_{A0} \frac{R}{(-r_A)}$ $V = F_{A0} \frac{R}{(-r_A)}$	 <p>ÁREA = $\frac{\tau}{C_{A0}} = \frac{V}{F_{A0}}$</p>
MISTURA EM SÉRIE	$\tau = \sum_{i=0}^{n-1} C_{Ai} \frac{R_i}{(-r_A)}$ $V = \sum_{i=0}^{n-1} F_{Ai} \frac{R_i}{(-r_A)}$	 <p>ÁREA = $\frac{\tau_i}{C_{Ai-1}} = \frac{V_i}{F_{Ai-1}}$</p>

TABELA 5.8 - RELAÇÃO DE VOLUMES ENTRE REATORES DE MISTURA E TUBULARES

RENDIMENTO (%)	NÚMERO DE REATORES					
	1	2	4	6	10	∞
90	3,0	2,0	1,5	1,3	1,2	1,0
95	6,0	2,5	1,6	1,3	1,2	1,0
98	13,0	3,0	1,8	1,4	1,3	1,0
99	21,0	4,0	1,9	1,5	1,4	1,0

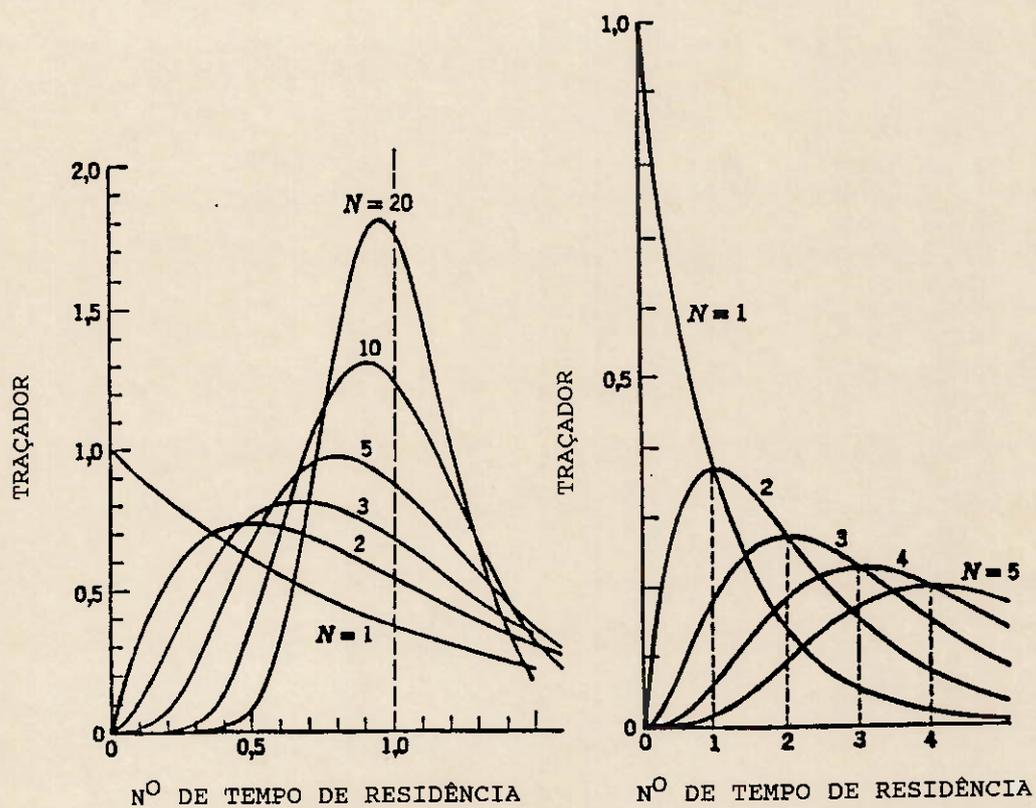


FIGURA 5.34 - CURVAS DTR PARA O MODELO DE REATORES DE MISTURA EM SÉRIE [64]

residência o reator de mistura apresenta apenas 63% de seu volume com permanência no tempo especificado, enquanto para 4 reatores em série este valor alcança 95%.

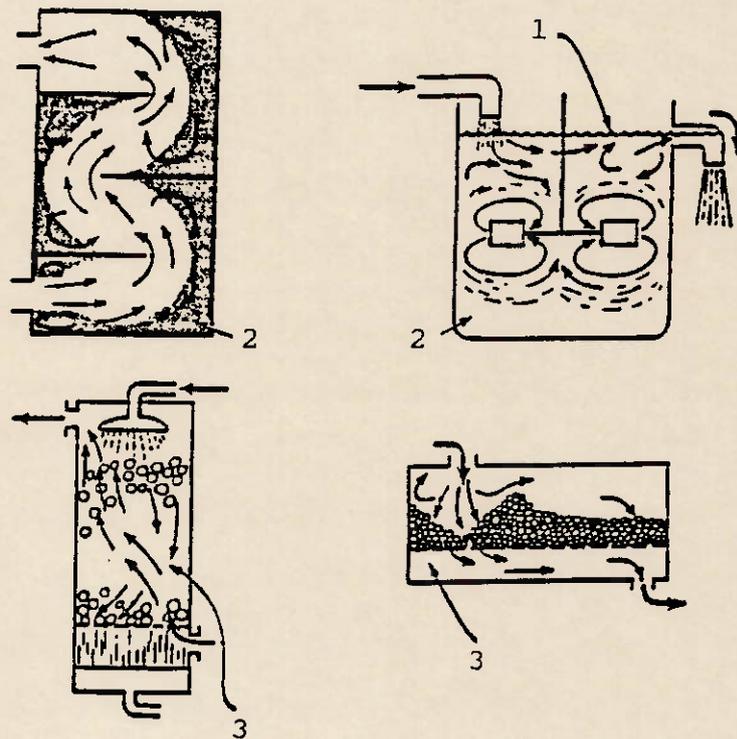
Estas diferenças de tempos são bastante importantes no processo de flotação, conforme analisado acima.

5.4.3 Escoamento não ideal

Os reatores reais nunca seguem completamente os padrões ideais de escoamento. O desvio da idealidade pode ser causado pela formação de canais preferenciais ou pelo reciclo de fluido, ou ainda pela criação de regiões estagnadas. A figura 5.35 mostra alguns exemplos.

O escoamento em reator de mistura ideal apresenta dispersão infinita, enquanto que o reator tubular ideal possui dispersão nula. Num reator tubular que apresenta escoamento não ideal, deve ser avaliada a dispersão para termos uma melhor análise do tempo de residência, tendo influência direta na cinética da flotação.

Em todos os tipos de equipamentos de processo, tais como trocadores de calor, colunas de enchimento, colunas de flotação e outros, os problemas de escoamento não-ideal estão intimamente ligados ao aumento de escala ocorrido em projetos. Este ponto nem sempre é bem analisado, sendo a causa de muitos dos desvios ocorridos entre o projetado e o real, bem como a causa de valores exagerados para os fatores de segurança. Quando este fato não é considerado pode ocasionar erros grosseiros. No projeto de coluna de flotação existe uma preocupação específica com este fato,



- 1 . CURTO CIRCUITO
- 2 . REGIÕES ESTAGNADAS
- 3 . CANAIS PREFERENCIAIS

FIGURA 5.35 - MODELOS DE ESCOAMENTO NÃO-IDEAL EM EQUIPAMENTOS DE PROCESSO [64]

sendo considerada com muito destaque a dispersão da polpa através do número de dispersão, N_d , o qual será detalhado na seqüência do capítulo [68].

A figura 5.36 mostra como a distribuição do tempo de residência é influenciada pela dispersão.

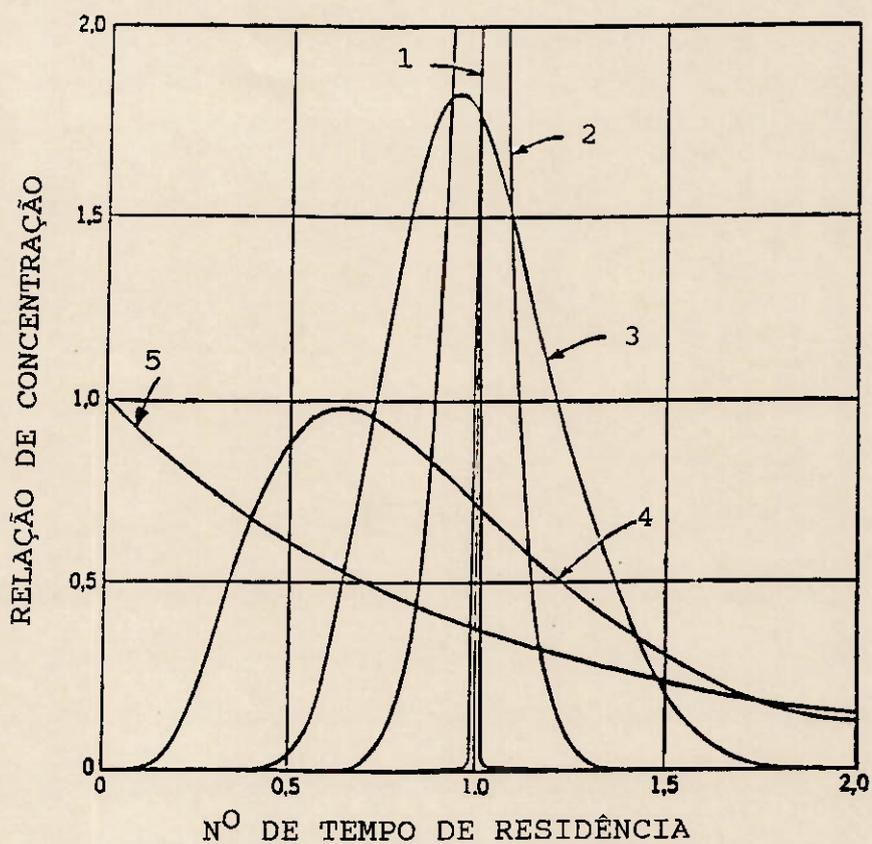
5.4.4 Seqüência para dimensionamento de um reator

O projeto de um reator consta basicamente de três grandes etapas:

- . levantamento de dados cinéticos e físico-químicos do fenômeno em estudo,
- . dimensionamento do volume do reator,
- . projeto da instalação em termos de parâmetros mecânicos, elétricos, instrumentação, etc.

A obtenção dos dados cinéticos e físico-químicos do fenômeno pode ser feita a partir da literatura, instalações já existentes ou levantamento experimental. A obtenção de dados experimentais pode ser feita em escala laboratorial ou piloto. Os dados cinéticos da coluna de flotação da barita foram obtidos através de ensaios piloto que serão descritos mais adiante.

O dimensionamento do tamanho de um reator é realizado utilizando-se de modelos matemáticos e de experiência de dimensionamento de instalações similares. Uma estimativa inicial pode ser realizada a partir dos modelos dos reatores ideais vistos anteriormente. Contudo existem



- 1 . DISPERSÃO NULA - ESCOAMENTO TUBULAR
- 2 . PEQUENA DISPERSÃO
- 3 . DISPERSÃO INTERMEDIÁRIA
- 4 . GRANDE DISPERSÃO
- 5 . DISPERSÃO INFINITA - ESCOAMENTO EM MISTURA

FIGURA 5.36 - INFLUÊNCIA DA DISPERSÃO NA DISTRIBUIÇÃO DO TEMPO DE RESIDÊNCIA [64]

modelamentos específicos para cada equipamento levando em consideração as suas peculiaridades. No dimensionamento da coluna de flotação de barita foi utilizado o modelo proposto por Finch, Dobby, Yanatos e Espinosa-Gomez, o qual será detalhado no item 5.5

5.5 Equações básicas para modelamento e dimensionamento de colunas de flotação

Um dos motivos da crescente aplicação da coluna de flotação em escala industrial consiste na possibilidade de modelamento de seus principais fenômenos. Este fato possibilita o dimensionamento de instalações industriais a partir de ensaios de flotação em instalações piloto.

Utilizando-se os modelos matemáticos propostos por Yianatos, Espinosa-Gomez, Finch, Laplante e Dobby [1], [69], [70] juntamente com dados experimentais é possível correlacionar os parâmetros operacionais básicos da coluna de flotação com seus parâmetros geométricos.

Estes modelos propostos levam em conta principalmente dois fatores importantes [71]:

- . aspectos cinéticos do processo de flotação, considerando que o fenômeno segue uma cinética de primeira ordem em relação à concentração dos sólidos, sendo portanto a recuperação dependente da constante cinética, do tempo médio de residência e da dispersão da polpa no equipamento [72], [73], [74],

. aspectos hidrodinâmicos da polpa, considerando que a coluna de flotação funciona como um reator de regime tubular com dispersão axial [75], [76].

O modelo de dimensionamento da coluna de flotação baseia-se na divisão do equipamento em duas zonas bastante distintas: zona de recuperação e zona de limpeza. A zona de recuperação apresenta, no presente momento, um modelo mais completo que a zona de limpeza.

5.5.1 Zona de recuperação

Considerando-se um reator em regime tubular ideal e o fenômeno com cinética de primeira ordem, o rendimento é uma função do tempo de residência da seguinte forma [77], [78]:

$$R = 1 - e^{-kt} \quad \text{eq. 5.25}$$

Considerando-se um reator de mistura ideal e o fenômeno com cinética de primeira ordem [79], o rendimento é uma função do tempo de residência da seguinte forma [39]:

$$R = \frac{kG}{1 + kG} \quad \text{eq. 5.26}$$

Caso a coluna de flotação se comportasse como um dos reatores ideais citados seria possível utilizar diretamente as equações 5.25 e 5.26. Contudo, conforme já foi citado, a coluna de flotação opera como um reator em regime tubular com dispersão [80]. Para este tipo de reator Levenspiel

propõe as seguintes equações [77], [81]:

$$R = 1 - \frac{4 a \exp(1/2Nd)}{(1+a)^2 \exp(a/2Nd) - (1-a)^2 \exp(-a/2Nd)} \quad \text{eq. 5.27}$$

$$a = (1 - 4k_c \zeta Nd)^{1/2} \quad \text{eq. 5.28}$$

As equações acima representam qualquer tipo de reator, mesmo os reatores ideais. A substituição do parâmetro de dispersão por zero ($Nd=0$) nas equações 5.27 e 5.28 conduz à equação 5.25. Para reatores de mistura perfeita, a substituição do parâmetro de dispersão por infinito ($Nd=\infty$) conduz à equação 5.26.

A expressão gráfica da equação 5.28 é feita na figura 5.37. Nesta figura o eixo das ordenadas corresponde à relação do volume de um reator ideal pelo volume mínimo (reator em regime tubular).

Para a execução dos cálculos, o coeficiente de dispersão das partículas sólidas é considerado igual ao da fase líquida, enquanto o coeficiente de dispersão depende de forma linear do diâmetro da coluna.

As equações para os cálculos iterativos da zona de recuperação são apresentadas na tabela 5.9. Nesta tabela são mostradas as equações para os cálculos dos seguintes parâmetros: Nd , coeficiente de dispersão dos sólidos (E_p), tempo de residência médio do líquido, tempo de residência médio das partículas sólidas, velocidade superficial da polpa, velocidade terminal de sedimentação das partículas, viscosidade da polpa, número de Reynolds das partículas,

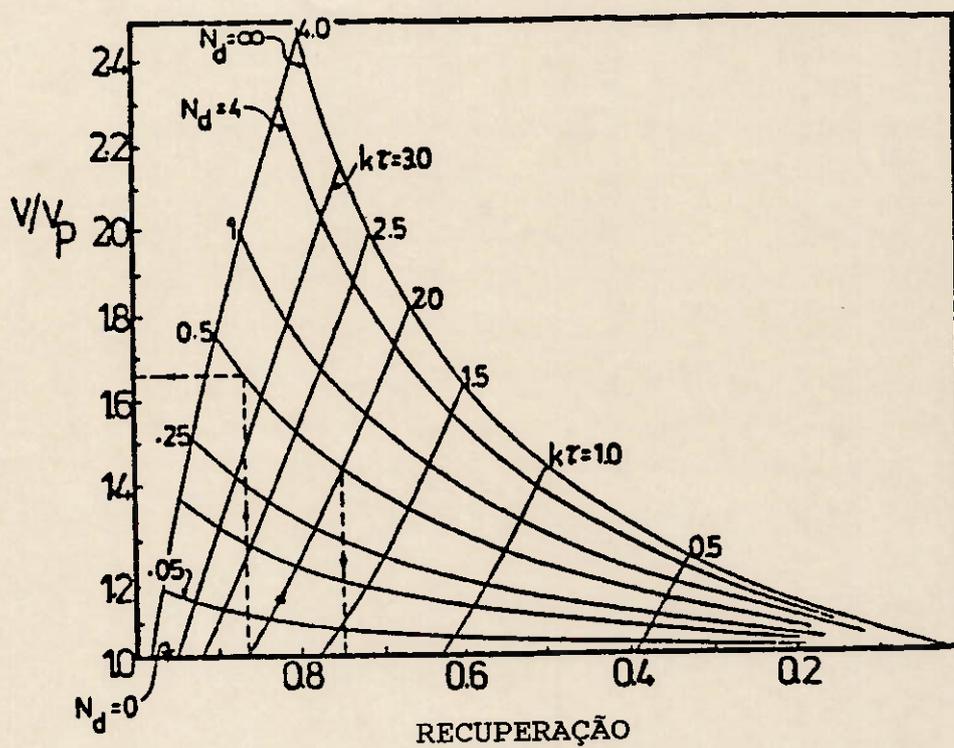


FIGURA 5.37 - EFEITO DOS PARÂMETROS DE DIPERSÃO EM FENÔMENOS DE CINÉTICA DE PRIMEIRA ORDEM [71]

TABELA 5.9 - RESUMO DAS EQUAÇÕES DO MODELAGEM DA ZONA DE RECUPERAÇÃO E LIMPEZA [71], [82]

ZONA DE RECUPERAÇÃO

$$R = 1 - (4ae^{1/2Nd}) / ((1+a)^2 e^{a/2Nd} - (1-a)^2 e^{-a/2Nd})$$

$$a = (1 + 4kc \zeta Nd)^{1/2}$$

$$Nd = 0,063dc (Jg/1,6)^{0,3} / ((Js1/(1-\xi g)) + Usp) / Hc$$

$$Rep = dpUsp \rho l (1 - \phi s) / \mu l$$

$$\zeta p = \zeta l (Js1/(1-\xi g)) / (Js1 / ((Js1/(1-\xi g)) + Usp))$$

$$Js1 = (Qfw + (1-R)Qfs) / Ac + Jb$$

$$\zeta l = 1,6667Hc(1-\xi g) / Js1$$

$$Us1 = gdp^2 (\rho p - \rho s1) (1 - \phi s)^{2,7} / (18 \mu f (1 + 0,15Rep^{0,0678}))$$

ZONA DE LIMPEZA

$$Rt = (Rk Rc) / (1 - Rk(1 - Rc))$$

$$Ca = 0,0682d_{80} \rho p$$

densidade da polpa, fração volumétrica dos sólidos na polpa, vazão volumétrica de água e de sólidos, etc [83].

5.5.2 Zona de limpeza

As condições do fluxo da zona de limpeza não são conhecidas como as da zona de recuperação. O fluxo na zona de limpeza depende de fatores tais como vazão de ar, "bias", porcentagem de sólidos na camada de espuma e partição de água entre entre concentrado e rejeito [84].

O tempo de residência das bolhas na coluna de flotação é geralmente maior que nas células mecânicas. Este fato gera a possibilidade de reciclo de sólidos da zona de limpeza para a zona de recuperação, que é mostrado abaixo:

$$R_t = \frac{R_k R_c}{1 - R_k (1 - R_c)} \quad \text{eq. 5.29}$$

onde:

R_t = recuperação total do mineral

R_k = recuperação do mineral na zona de coleta

R_c = recuperação do mineral na zona de limpeza

O cálculo da recuperação da zona de limpeza pode ser feito das seguintes maneiras [85], [86]:

- . cálculo da recuperação da zona de recuperação numa coluna de flotação sem camada de espuma e posteriormente o cálculo da recuperação da zona de limpeza pela equação 5.29,

- . estimativa da recuperação da zona de limpeza através de experimentos com coluna de flotação com variação da altura da camada de espuma,
- . estimativa da recuperação da zona de recuperação e da zona de limpeza através de experimentos em coluna de flotação operando em fluxo contracorrente e concorrente.

Outros fatores importantes para serem avaliados na zona de limpeza são: capacidade de carreamento e "lip loading". Estes dois parâmetros foram discutidos no item 5.3.3.2.

5.5.3 Limitações do modelo

Para a utilização das equações do modelo são necessários dados experimentais. As respostas do processo de flotação em condições operacionais adequadas constituem subsídios básicos para o modelamento. A confiabilidade dos resultados do modelamento de uma coluna de flotação é função da qualidade dos ensaios realizados em escala piloto. No estudo de processo e levantamento de dados para dimensionamento da flotação de barita foi utilizada uma instalação piloto de flotação em coluna que apresentou características construtivas e operacionais bem próximas às executadas no projeto industrial.

O modelo apresenta limitações na zona de limpeza apesar dos esforços para melhor compreensão do fenômeno (item 5.5.2).

A seqüência dos cálculos para dimensionamento é mostrada nos itens 7.5 e 7.6.

6 DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

6.1 Instalação piloto de flotação

6.1.1 Fluxograma da instalação

A unidade piloto de flotação em coluna consta das seguintes etapas [87] :

- . amostragem e transferência da polpa,
- . controle da vazão,
- . condicionamento dos reagentes,
- . diluição da polpa,
- . flotação em coluna.

O fluxograma da instalação piloto é mostrado na figura 6.1. A seguir serão feitos comentários sobre o circuito, detalhando as suas etapas.

AMOSTRAGEM E TRANSFERÊNCIA DA POLPA

Os ensaios piloto de flotação foram realizados "on line" com a usina de beneficiamento, sendo portanto necessária amostragem contínua da polpa. A amostragem da polpa foi realizada por uma cruzeta sendo encaminhada por mangote até uma bomba centrífuga vertical (BM1) para transferência ao tanque pulmão (TQ1).

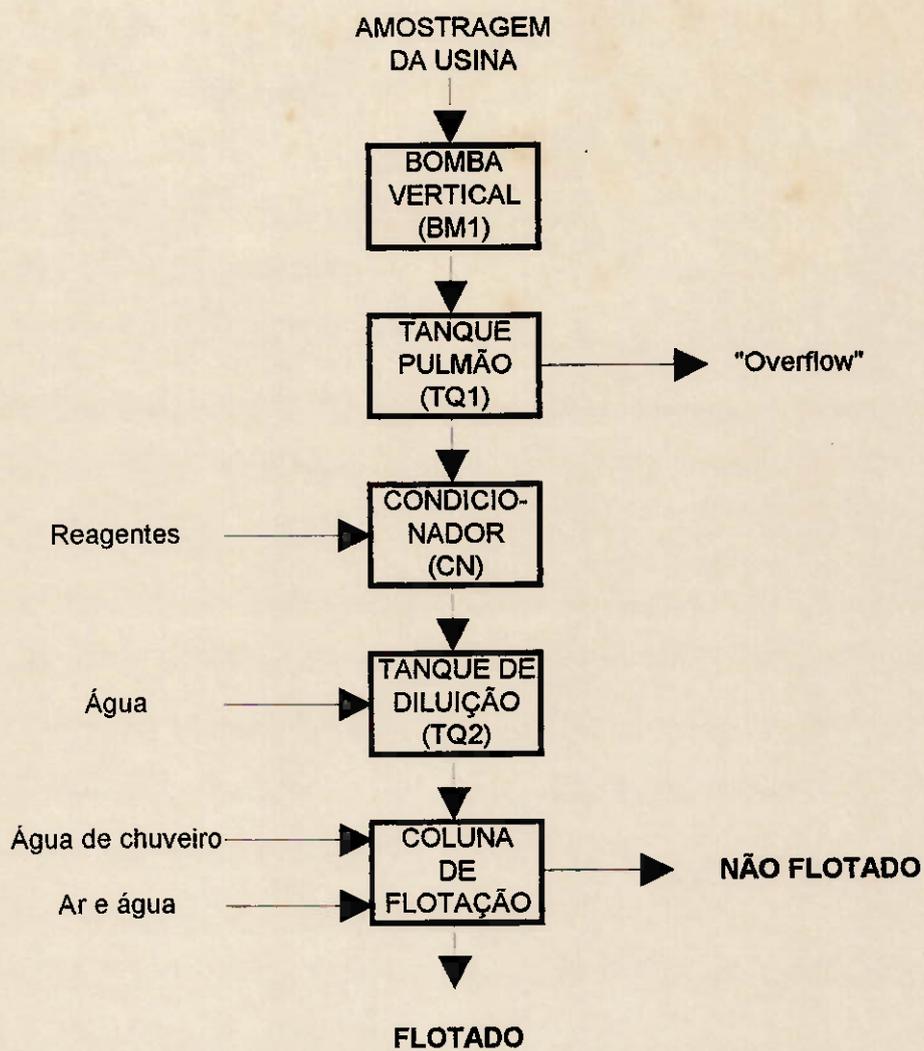


FIGURA 6.1 - DIAGRAMA DE BLOCOS DA UNIDADE PILOTO DE FLOTAÇÃO EM COLUNA

CONTROLE DE VAZÃO

O tanque pulmão (TQ1) possui duas funções básicas:

- . amortecer pequenas oscilações do fluxo amostrado na usina,
- . controlar a vazão de polpa.

O tanque TQ1 possui uma saída por "overflow" que deve ficar constantemente com transbordo de material para manter constante o nível do tanque. O controle de vazão de polpa é feito a partir de escoamento por orifício na parte inferior do tanque. Para cada vazão desejada utiliza-se um diâmetro específico. A taxa de alimentação de sólidos se estabelece portanto num valor praticamente constante devido ao fato da porcentagem de sólidos sofrer pouca oscilação.

CONDICIONAMENTO DOS REAGENTES

Após o controle da vazão, a polpa é encaminhada para um tanque condicionador com agitação mecânica. Neste tanque (CN) é adicionada solução de hidróxido de sódio (10 % em peso) para controle do pH.

A dosagem CESS (3 % em peso) e do espumante (reagente dosado puro) é feita na bomba centrífuga vertical (BM2) que transfere a polpa do condicionador ao tanque diluidor (TQ2). Estes reagentes requerem pouco tempo para condicionamento conforme ensaios realizados em escala de bancada (item 7.1.1).

A dosagem da solução de hidróxido de sódio, coletor e espumante é feita por bombas de pistão.

DILUIÇÃO DA POLPA

A bomba BM2 transfere a polpa ao tanque diluidor (TQ2), o qual apresenta agitação mecânica. Neste tanque é feito o controle da porcentagem de sólidos da polpa alimentada na coluna.

FLOTAÇÃO EM COLUNA

Após a diluição a polpa é alimentada por gravidade na coluna de flotação. A coluna possui as seguintes dimensões: diâmetro de 24" (61 cm) e altura total de 10,4 m.

A coluna de flotação possui chuveiro interno, controle de nível pneumático atuando na válvula de rejeito (tipo cônica) e aerador interno na parte inferior do equipamento. O concentrado e o rejeito obtidos a partir dos ensaios retornam ao circuito da usina de beneficiamento.

6.1.2 Critérios de dimensionamento da instalação

Para o dimensionamento da instalação piloto de flotação em coluna foram considerados os seguintes critérios [88]:

- . capacidade da unidade para 2 t/h de alimentação de sólidos,
- . possibilidade de variação da taxa de alimentação de 1,0 a 4,0 t/h de sólidos,
- . a instalação deve apresentar um bom controle da taxa de alimentação,
- . realização de ensaios com diferentes variáveis facilitando o "scale up" para a coluna industrial,

- . possibilidade de testar a confiabilidade da instrumentação da instalação piloto para dimensionar a industrial,
- . testar o desempenho do aerador a ser usado na instalação industrial (aerador Cominco),
- . realizar ensaios "on line" com a usina de beneficiamento com o objetivo de verificar a influência das variações ocorridas na usina industrial e mudanças de minério no comportamento da coluna de flotação.

A unidade piloto de flotação possui o objetivo de viabilizar o desenvolvimento do processo de flotação de barita, proporcionar um "scale up" com geometrias e filosofia mais próximas da industrial e avaliar a influência de perturbações de vazão e qualidade de minério na coluna de flotação.

6.1.3 Características dos equipamentos e instrumentação

Os principais equipamentos da instalação piloto de flotação são descritos a seguir [89]:

- . bomba BM1,
- . tanque pulmão TQ1,
- . tanque condicionador CN,
- . bomba BM2,
- . tanque diluidor TQ2,
- . coluna de flotação,
- . aerador,

- . chuveiro,
- . sistema de dosagem de reagentes.

BOMBA BM1

A BM1 é uma bomba centrífuga vertical (Denver) que transfere a polpa amostrada ao TQ1. Possui rotação de 1.745 rpm e motor de 15 Hp.

A utilização deste tipo de bomba se prende à necessidade de bombeamento de vazões variáveis devido à ocorrência de oscilações de vazão na polpa amostrada.

TANQUE PULMÃO TQ1

O tanque pulmão TQ1 recebe o material que alimentará a unidade de flotação em coluna. Possui as seguintes características:

- . dimensões: diâmetro : 160 cm
altura : 200 cm
volume total: 4.000 l
volume útil : 3.200 l
- . saída para dreno de 2" (5,1 cm) de diâmetro localizada na lateral com válvula de fecho rápido,
- . saída lateral para transbordo do excesso de polpa localizada a 160 cm da base, do lado oposto à saída para a alimentação do CN, com anteparo instalado a partir da hélice superior para evitar curto-circuito,
- . saída lateral para alimentação do CN para controle de vazão,

- . quatro quebra vortex de 12 cm de largura, 3/16" (4,8 mm) de espessura e afastados 5 cm da parede do tanque, instalados do fundo do tanque até 15 cm acima do nível da polpa,
- . a alimentação da polpa proveniente da BM1 é dirigida para o centro do cone do vortex do agitador para minimizar a possibilidade de curto-circuito com a saída lateral de transbordo,
- . agitação com sistema de hélice dupla com quatro pás cada uma, sendo as pás da hélice superior inclinadas de 45° e as da hélice inferior retas,
- . agitação com rotação de 110 rpm, eixo com diâmetro de 3" (7.6 cm), pá com largura de 14 cm, hélice com diâmetro de 64 cm, distância entre as linhas de centro das hélices de 67 cm, distância da hélice inferior ao fundo do tanque de 40 cm, motor de 15 Hp com sistema de redução.

TANQUE CONDICIONADOR CN

O tanque condicionador CN recebe a polpa do TQ1 e transfere a BM2. Possui as seguintes características:

- . dimensões: diâmetro : 80 cm
altura : 100 cm
volume total: 500 l
volume útil : 425 l
- . saída para dreno de 2" (5,1 cm) de diâmetro localizada na lateral com válvula de fecho rápido,
- . 3 saídas laterais para transbordo de polpa localizadas a 85 cm, 55 cm e 33 cm da base com 3" (7,6 cm) de diâmetro,

- . três quebra vortex de 6 cm de largura, 3/16" (4,8 mm) de espessura afastados de 2 cm da parede do tanque, instalados do fundo do tanque até 10 cm acima do nível da polpa,
- . a alimentação da polpa proveniente do TQ1 é dirigida para o centro da camisa de recirculação ("draft tube") de 8" (20,3 cm) de diâmetro para minimizar a possibilidade de curto-circuito com a saída lateral de transbordo,
- . agitação com sistema de hélice com quatro pás inclinadas de 45°,
- . agitação com rotação de 200 rpm, eixo com diâmetro de 1 1/2" (3,8 cm), pá com largura de 5,5 cm, hélice com diâmetro de 32 cm, distância da hélice ao fundo do tanque de 15 cm, motor de 2 Hp com sistema de redução.

BOMBA BM2

A BM2 é uma bomba centrífuga vertical (Denver) que transfere a polpa do CN ao tanque diluidor TQ2. Possui rotação de 1.107 rpm com motor de 5 Hp.

TANQUE DILUIDOR TQ2

O tanque diluidor TQ2 recebe a polpa da BM2 e a transfere para a coluna de flotação. Possui as seguintes características:

- . dimensões: diâmetro : 80 cm
- altura : 100 cm
- volume total: 500 l
- volume útil : 425 l

- . saída para dreno de 2" (5,1 cm) de diâmetro localizada na lateral com válvula de fecho rápido,
- . saída lateral para transbordo de polpa localizada a 85 cm da base com 3" (7,6 cm) de diâmetro,
- . três quebra vortex de 6 cm de largura, 3/16" (4,8 mm) de espessura afastados 2 cm da parede do tanque, instalados do fundo do tanque até 10 cm acima do nível da polpa,
- . a alimentação da polpa proveniente da BM2 é dirigida para o centro do vortex do agitador,
- . agitação com sistema de hélice com quatro pás inclinadas de 45°,
- . agitação com rotação de 200 rpm, eixo com diâmetro de 1 1/2" (3,8 cm), pá com largura de 5,5 cm, hélice com diâmetro de 32 cm, distância da hélice ao fundo do tanque de 15 cm, motor de 2 Hp com sistema de redução.

COLUNA DE FLOTAÇÃO

Após o controle da porcentagem de sólidos no TQ2 a polpa é encaminhada por gravidade para a coluna de flotação.

O sistema de lavagem da espuma e o sistema de aeração serão descritos a parte devido à sua importância no processo de flotação em coluna.

A coluna piloto de flotação foi construída com o objetivo de atender tanto os ensaios de desenvolvimento de processo, quanto aqueles para dimensionamento e para acompanhamento de processo.

A coluna de flotação piloto apresenta as seguintes características (figura 6.2) [90]:

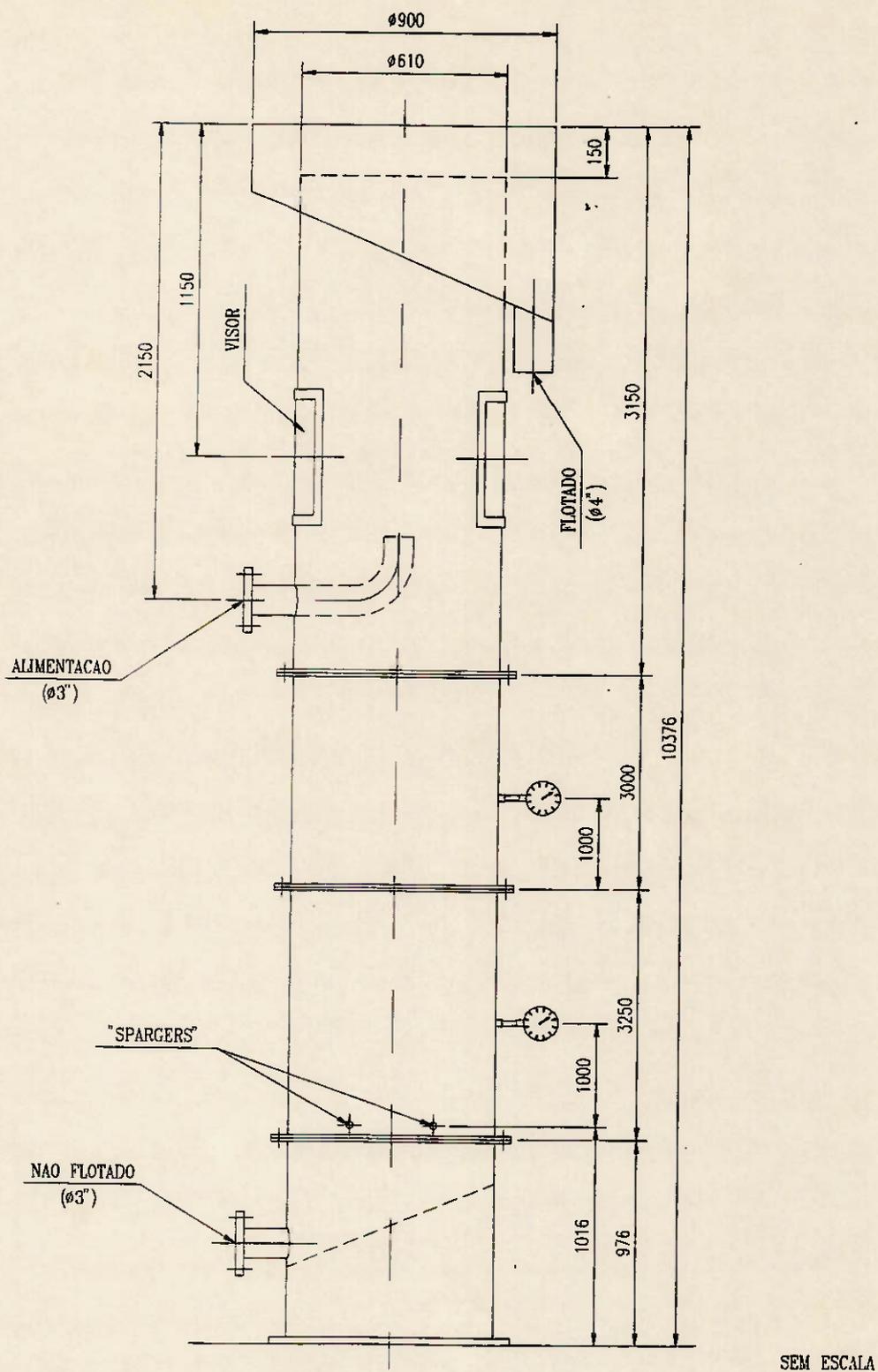


FIGURA 6.2 - ESQUEMA DA COLUNA PILOTO DE FLOTAÇÃO DA ARAFÉRTIL

- . dimensões: diâmetro interno : 24" (61 cm)
- altura total : 10,4 m
- altura do aerador ao transbordo: 9,0 m
- volume total : 3.039 l
- volume do aerador ao transbordo: 2.630 l
- . construção em chapa de aço carbono com espessura de 1/4" (63,5 mm),
- . constituída de 4 módulos flangeados (módulos 1,2,3 e 4),
- . módulo 1 com 97,6 cm de altura, englobando a base de sustentação da coluna e a saída do rejeito,
- . módulo 2 com 325 cm de altura, contendo dois aeradores tipo lanças perfuradas (Cominco) e um manômetro localizado a 1 m acima do aerador,
- . módulo 3 com 300 cm de altura com um manômetro localizado a 1 m da flange inferior,
- . módulo 4 com 315 cm de altura contendo o sistema de alimentação da polpa, calha para coleta do concentrado, dois visores de acrílico (20 x 40 cm) no corpo da coluna, um visor externo de nível em tubo transparente e sensor externo com atuação na válvula de controle pneumático da saída do rejeito,
- . alimentação tipo cachimbo com curva de 3" (7,6 cm), mostrado na figura 6.3.

AERADOR

O sistema de aeração utilizado foi da Cominco Engineering Services Ltd., tendo sido importado do Canadá.

O sistema de aeração consiste de uma câmara de mistura ar - água (misturador) de 4" (10,2 cm) de diâmetro e duas lanças

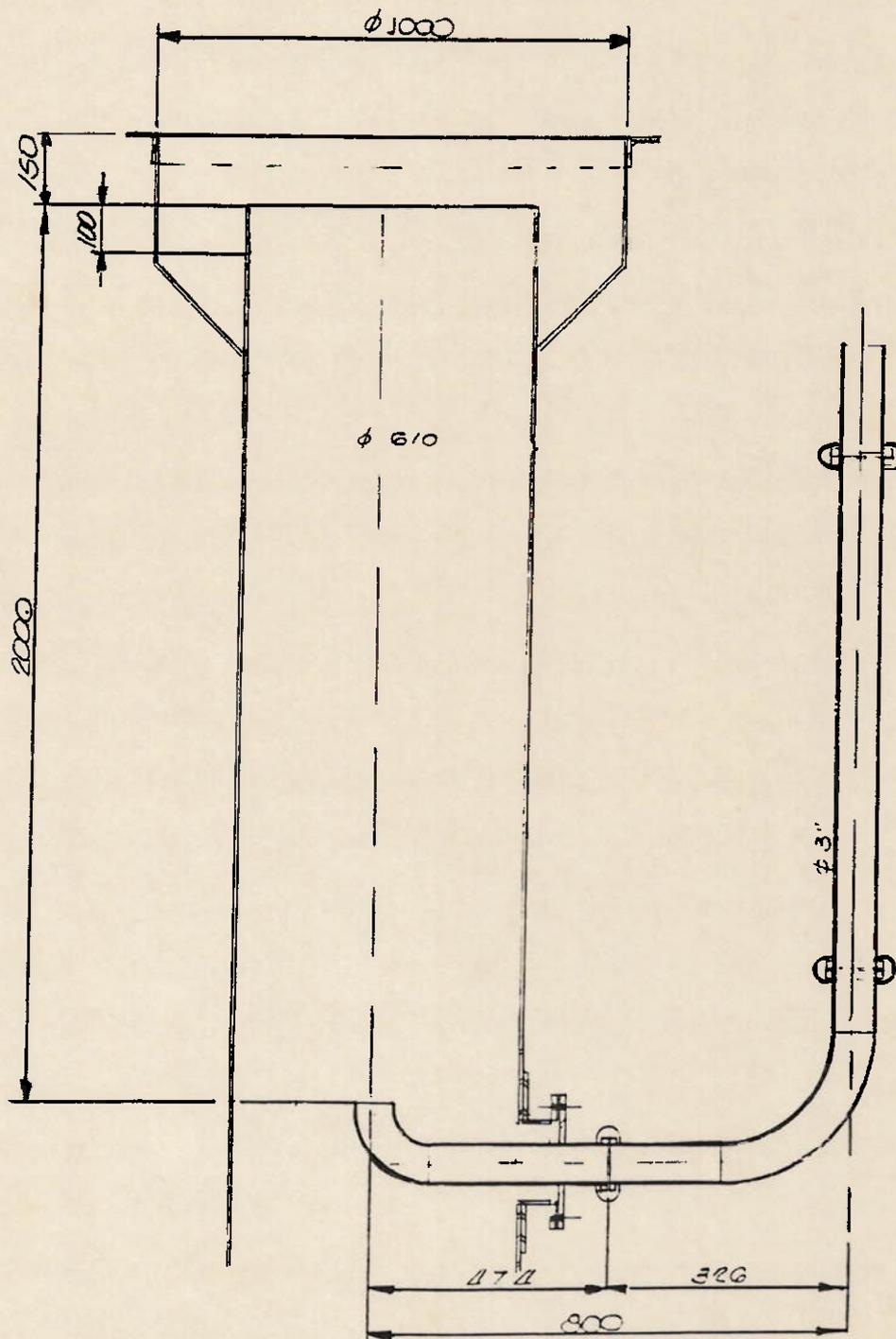


FIGURA 6.3 - SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO DA COLUNA PILOTO DE FLOTAÇÃO

perfuradas ("spargers"). Cada "sparger" (figura 6.4) apresenta 2 filas de orifícios de 0,9 mm em inserto de carbeto de tungstênio, num total de 36 orifícios (18 em cada fila) com relação de 62 orifícios/m² [91],[92].

O misturador recebe a alimentação de ar e água. Esta mistura é encaminhada para os "spargers" por mangueiras para alta pressão com alma de nylon. A mistura ar/água é injetada na coluna à pressão de 4,5 kgf/cm². Ao entrar na coluna ocorre instantaneamente a diminuição da pressão para cerca de 1,5 kgf/cm², gerando as bolhas. Neste sistema ocorre grande extensão de cavitação necessitando de inserto de carbeto de tungstênio para prevenir o desgaste dos orifícios. O sistema de fixação dos "spargers" na coluna proporciona fácil remoção para inspeção, mesmo com a coluna em funcionamento, conforme mostrado na figura 6.5.

CHUVEIRO

O sistema de água de lavagem da coluna de flotação possui as seguintes características [93]:

- . construção em aço carbono,
- . tubo de alimentação de água com diâmetro externo de 3" (7,6 cm),
- . tubos de distribuição de água com diâmetro externo de 1/2" (1,3 cm) distribuídos em duas filas com 6 tubos em cada uma, conforme figura 6.6,
- . cada tubo possui duas filas de orifícios de 7/64" (2,8 mm), num total de 120 (10 orifícios em cada tubo), inclinados com ângulo de 45° para cima.

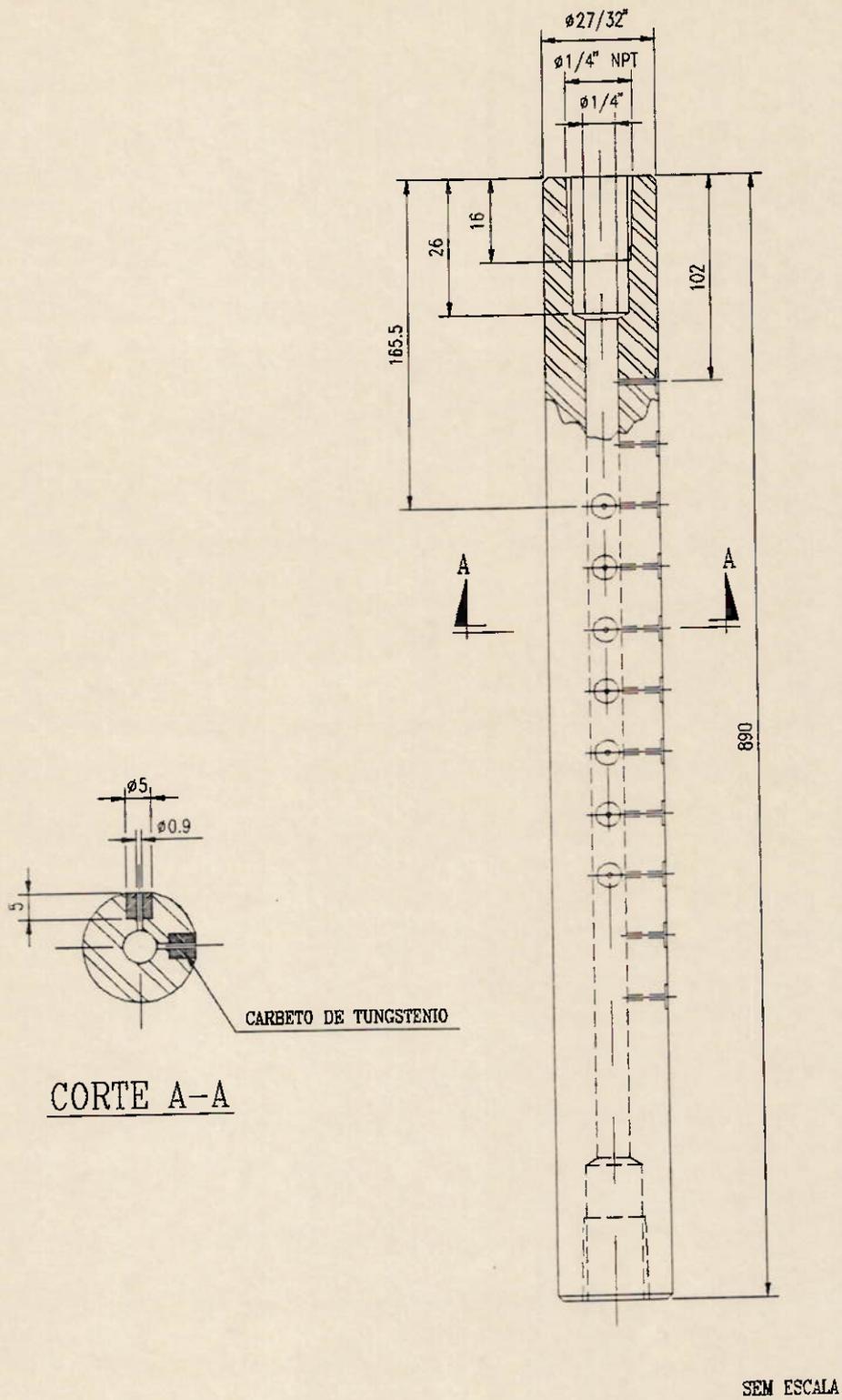


FIGURA 6.4 - ESQUEMA DO "SPARGER" DA COMINCO"

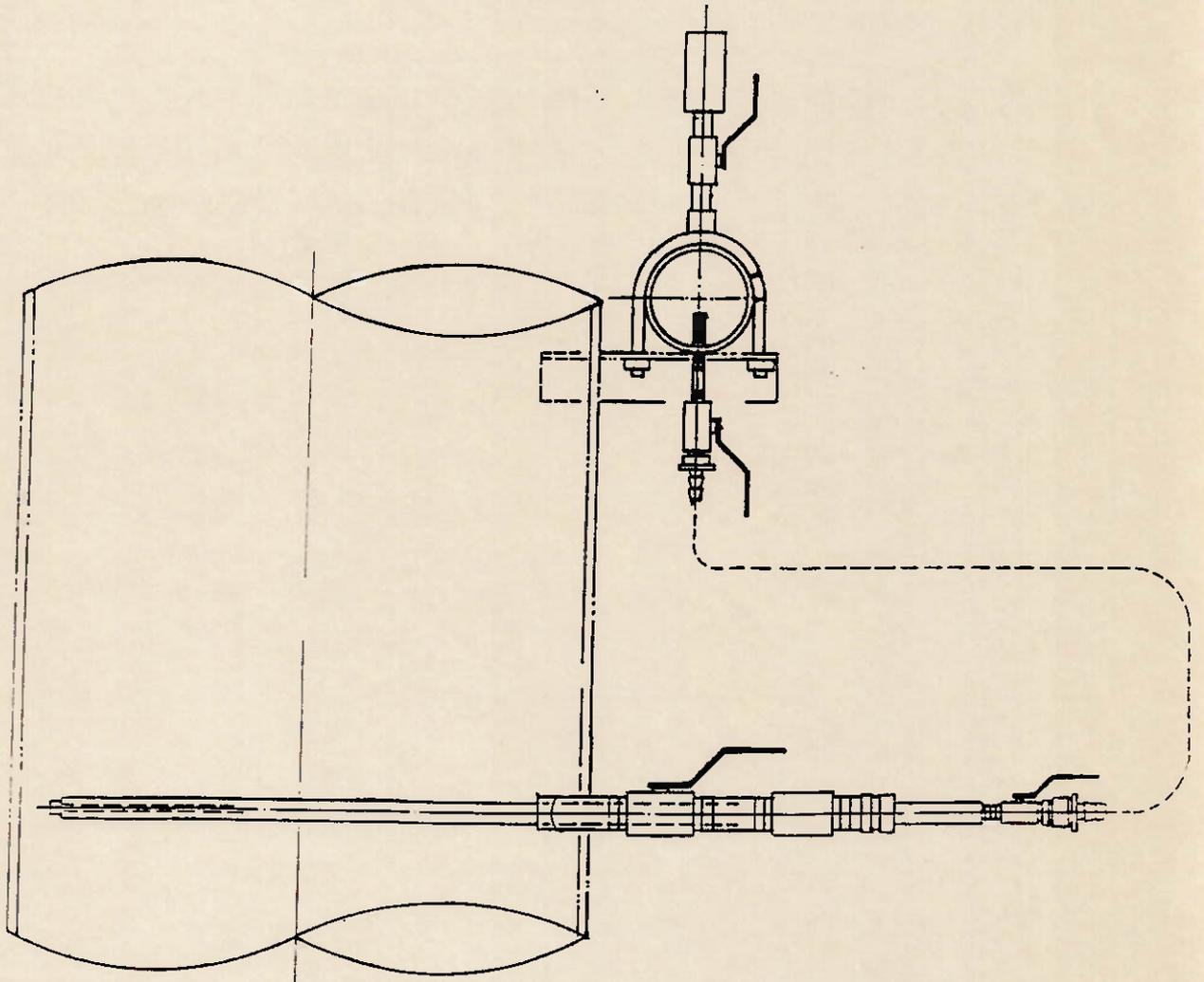
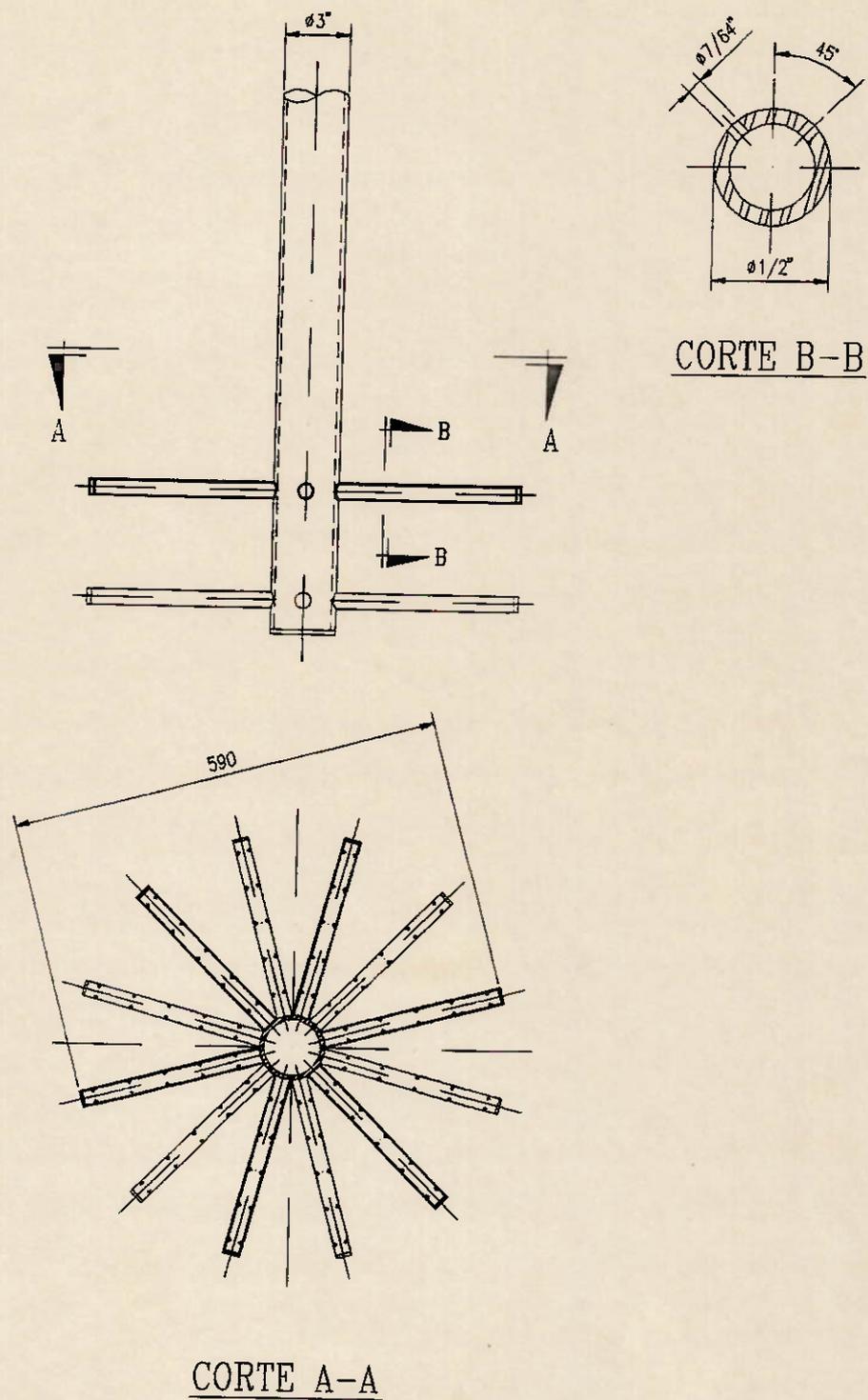


FIGURA 6.5 - SISTEMA DE AERAÇÃO DA COLUNA PILOTO DE FLOTAÇÃO



SEM ESCALA

FIGURA 6.6 - SISTEMA DE LAVAGEM DO CONCENTRADO DA COLUNA PILOTO DE FLOTAÇÃO

SISTEMA DE DOSAGEM DE REAGENTES

A dosagem de reagentes (soda, CESS e espumante) foi feita por bombas de pistão com sucção negativa dos reservatórios dos reagentes.

O sistema de instrumentação e controle da instalação piloto de flotação é descrito a seguir, com o objetivo de controle das seguintes variáveis:

- . vazão da polpa alimentada por escoamento em orifício no TQ1 descrito no item 6.1.1,
- . dosagem de reagentes pela velocidade do pistão da bomba (controle manual),
- . porcentagem de sólidos na alimentação da coluna através da adição de água no TQ2 por válvula (controle manual),
- . vazão da água de lavagem através de válvula (controle manual),
- . nível da coluna através de sensor externo à coluna atuando pneumaticamente na válvula de rejeito tipo cônica (controle automático) conforme mostrado na figura 6.7,
- . velocidade superficial do ar pela vazão de ar através de regulador de pressão e rotâmetro (controle manual) conforme figura 6.8 [94],
- . pressão no misturador ar - água pela vazão de água através de bomba de deslocamento positivo tipo Nemo e rotâmetro (controle manual), conforme figura 6.9 [94].

A instalação apresentou instrumentação e controle simples, conforme mostrado de forma global na figura 6.10 [95].

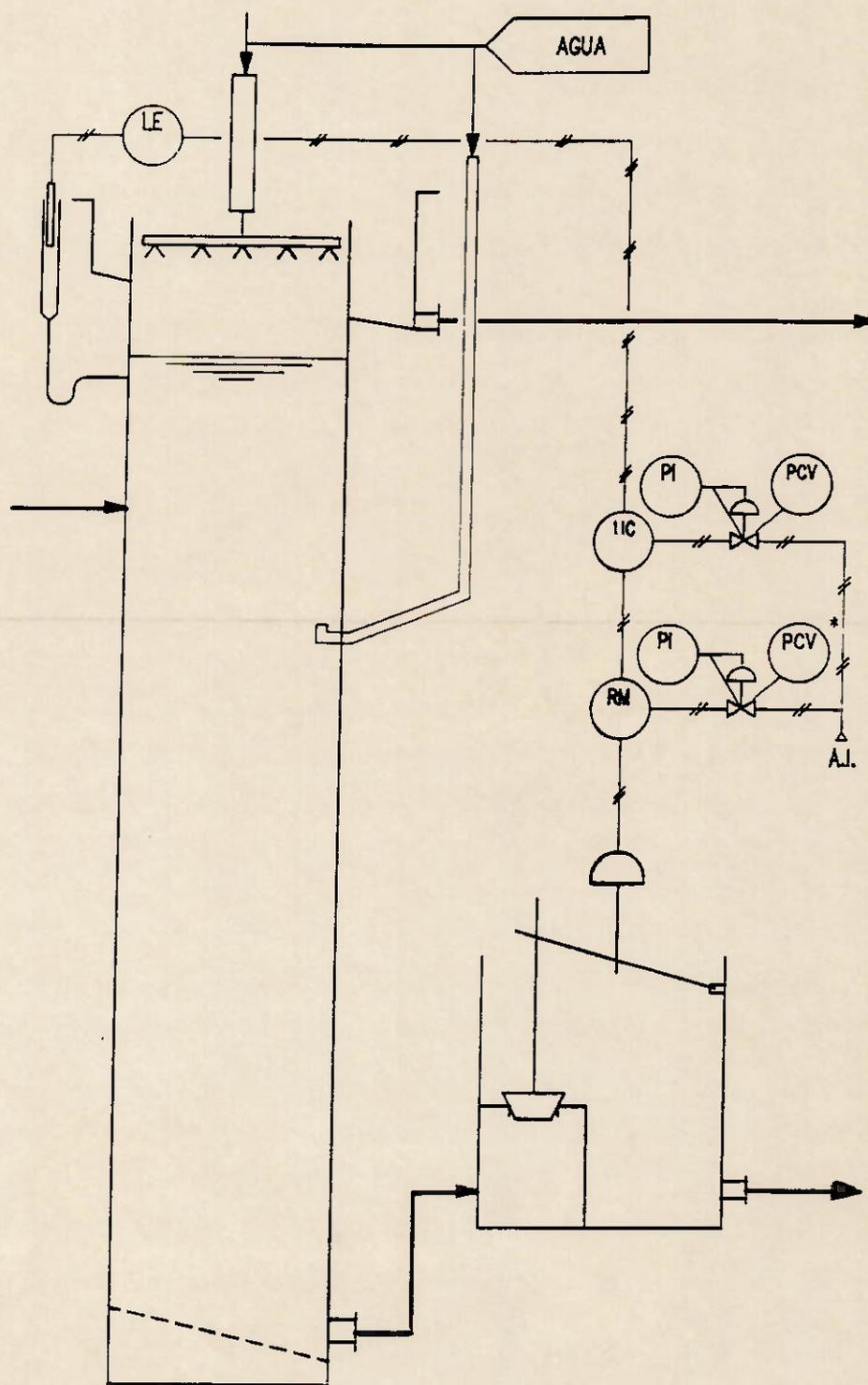
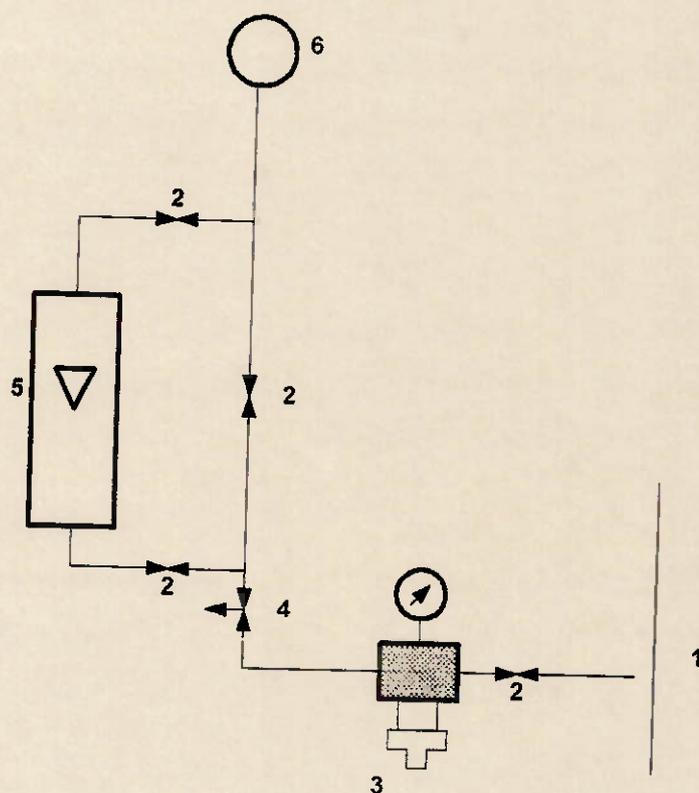
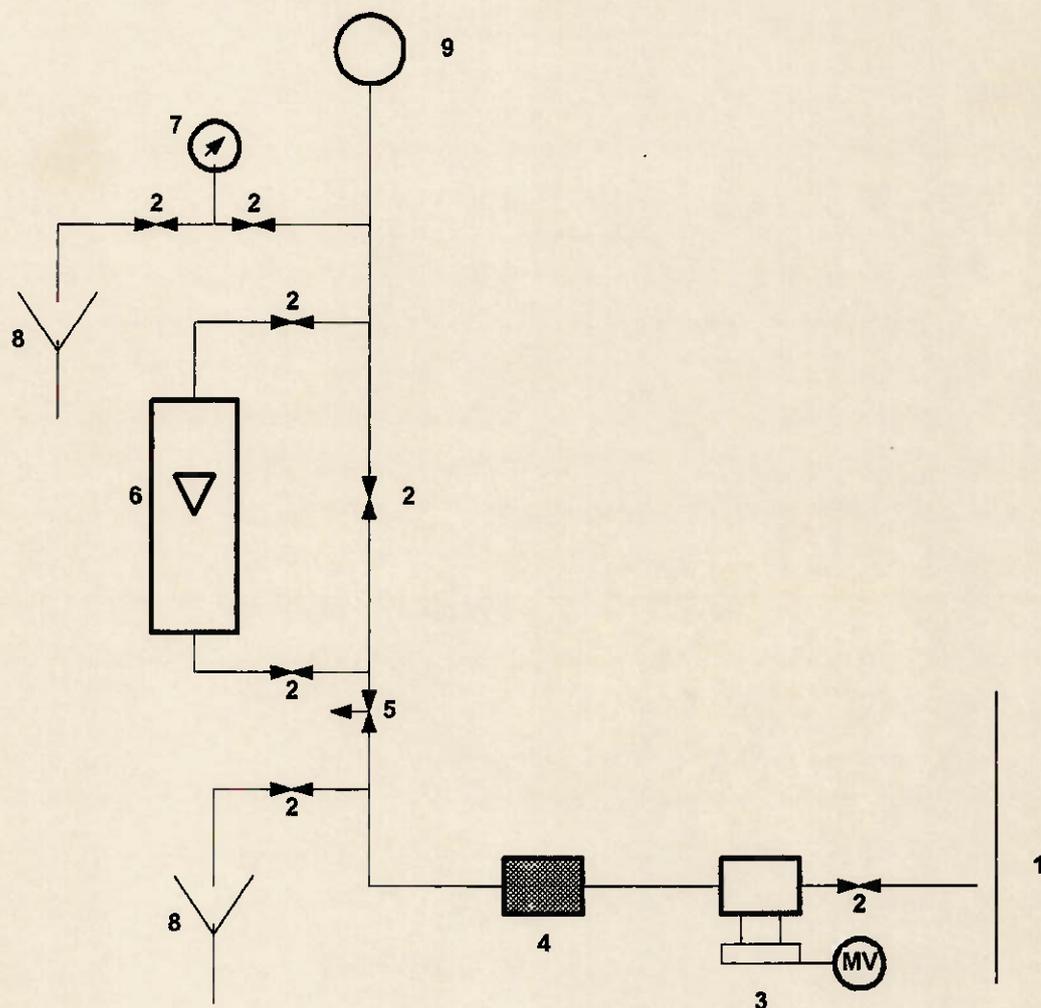


FIGURA 6.7 - SISTEMA DE CONTROLE DE NÍVEL DA COLUNA PILOTO DE FLOTAÇÃO



- 1 - REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE AR
- 2 - VÁLVULA ABRE-FECHA
- 3 - FILTRO E REGULADOR DE PRESSÃO
- 4 - VÁLVULA DE CONTROLE
- 5 - ROTÂMETRO PARA AR
- 6 - MISTURADOR AR-ÁGUA

FIGURA 6.8 - SISTEMA DE CONTROLE DA VAZÃO DE AR DO AERADOR DA COLUNA PILOTO DE FLOTAÇÃO



- 1 - REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA
- 2 - VÁLVULA ABRE-FECHA
- 3 - BOMBA NEMO COM VARIADOR DE VELOCIDADE
- 4 - FILTRO PARA ÁGUA (TELA)
- 5 - VÁLVULA DE CONTROLE
- 6 - ROTÂMETRO PARA ÁGUA
- 7 - MANÔMETRO
- 8 - DRENO
- 9 - MISTURADOR AR-ÁGUA

FIGURA 6.9 - SISTEMA DE CONTROLE DA VAZÃO DE ÁGUA DO AERADOR DA COLUNA PILOTO DE FLOTAÇÃO

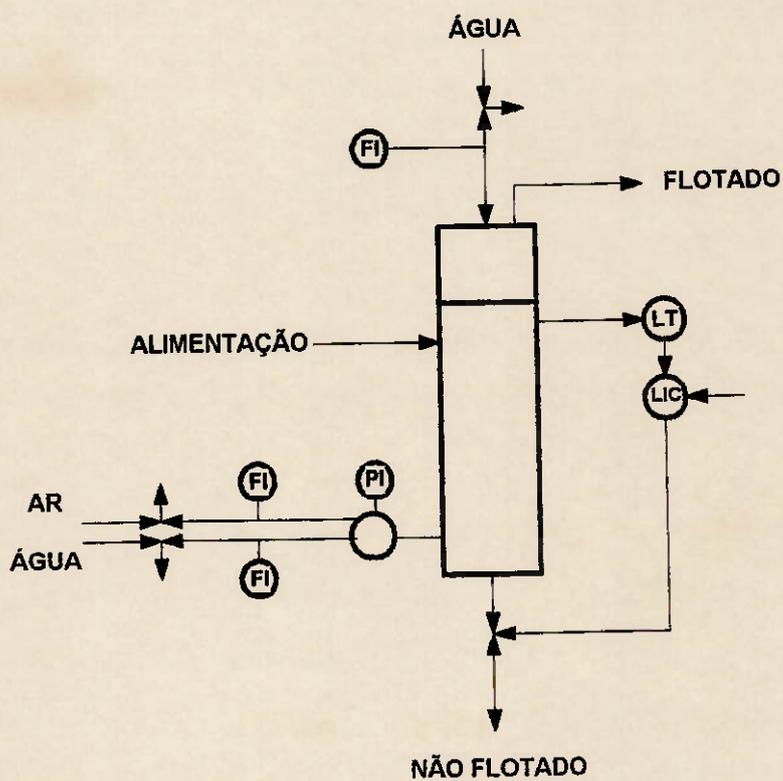


FIGURA 6.10 - SISTEMA DE CONTROLE DA COLUNA PILOTO DE FLOTAÇÃO

6.1.4. Custo da instalação

A unidade piloto de flotação em coluna apresentou custo total de US\$ 20.000,00 [96]. A distribuição deste custo é apresentada na tabela 6.1.

Alguns equipamentos já existentes na Arafertil foram aproveitados, tais como:

- . bombas dosadoras de reagentes,
- . controlador de nível,
- . motores para o acionamento do sistema de agitação (tanque pulmão, condicionador, tanque para diluição),
- . bombas centrífugas verticais (BM1 e BM2).

O suprimento de água, soda e ar foi feito a partir das linhas já existentes na usina de beneficiamento.

A escolha do local da instalação foi de fundamental importância para facilitar a amostragem e o acesso dos operadores, bem como proporcionar economia na fabricação de estrutura.

O cronograma da instalação teve duração total de 4 meses incluindo deste o projeto até a pré-operação (tabela 6.2) [97].

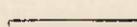
Na pré-operação da instalação foram feitas algumas modificações em termos de "lay-out", aumento do diâmetro da tubulação de água e ajustes no controlador de nível [98].

TABELA 6.1 - CUSTO DA UNIDADE PILOTO DE FLOTAÇÃO EM COLUNA

DESCRIÇÃO	VALOR (US\$)
PROJETO	1.000,00
MATERIAIS	8.100,00
EQUIPAMENTOS	2.500,00
ELÉTRICA E INSTRUMENTAÇÃO	3.000,00
MONTAGEM	3.000,00
PINTURA	1.000,00
OUTROS	1.400,00
TOTAL	20.000,00

TABELA 6.2 - CRONOGRAMA DO PROJETO DA UNIDADE PILOTO DE FLOTAÇÃO EM COLUNA

DETALHE	MESES			
	1	2	3	4
1. PROJETO				
2. COMPRA DE MATERIAIS				
3. COMPRA DE EQUIPAMENTOS				
4. FABRICAÇÃO				
5. MONTAGEM ESTRUTURAL				
6. MONTAGEM MECÂNICA				
7. MONTAGEM ELÉTRICA - INST.				
8. PRÉ - OPERAÇÃO				

 REALIZADO
 PROJETADO

6.2 Ensaios de flotação em coluna em escala piloto

Os ensaios piloto de flotação de barita em coluna foram divididos em 2 blocos:

- . ensaios para desenvolvimento de processo,
- . ensaios para dimensionamento.

Estes ensaios foram realizados durante 4 meses, sendo portanto utilizados minérios de diferentes pilhas que foram retomadas para a usina de beneficiamento, num total de 150 ensaios em 23 pilhas.

Em todos estes ensaios procurou-se avaliar a influência de cada variável, através de sua variação mantidas as demais constantes.

6.2.1 Ensaios para desenvolvimento de processo

Para o desenvolvimento de processo de flotação de barita em coluna de flotação foi realizada uma seqüência de ensaios piloto com o objetivo avaliar a influência das seguintes variáveis:

- . nível de dosagem de coletor (Flotisor S72),
- . nível de dosagem de espumante (Flotanol D14),
- . pH de condicionamento da polpa,
- . altura da camada de espuma,
- . velocidade superficial do ar,
- . velocidade da água de chuveiro,

- . porcentagem de sólidos da polpa alimentada na coluna de flotação.

Os ensaios apresentaram boa reprodutividade, sendo desconsiderados aqueles que sofreram influência de algum problema operacional da instalação.

Nesta fase foram realizados 80 ensaios.

6.2.2 Ensaios para dimensionamento

Para a determinação dos parâmetros de dimensionamento de uma coluna industrial (constante cinética e número de dispersão) para flotação de barita em coluna de flotação foi realizada uma seqüência de ensaios piloto com o objetivo de avaliar a influência das seguintes variáveis:

- . porcentagem de sólidos da polpa alimentada na coluna de flotação,
- . taxa de alimentação de sólidos,
- . altura da zona de recuperação.

Os ensaios apresentaram boa reprodutividade, não sendo considerados aqueles que sofreram influência de algum problema operacional da instalação.

Nesta fase foram realizados 70 ensaios.

O programa de amostragem adotado nos ensaios é mostrado na tabela 6.3.

**TABELA 6.3 - PROGRAMA DE AMOSTRAGEM DOS ENSAIOS PILOTO DE
FLOTAÇÃO EM COLUNA**

FLUXO	VAZÃO	SÓLIDOS (%)	pH	QUÍMICA
1 . ALIMENTAÇÃO DO CN	X	X		X
2 . SAÍDA DO CN			X	
3 . ESPUMANTE	X			
4 . COLETOR	X			
5 . ALIMENTAÇÃO DA COLUNA	X	X		
6 . ÁGUA DE CHUVEIRO	X			
7 . AR DO AERADOR	X			
8 . FLOTADO		X		X
9 . NÃO FLOTADO		X		X

6.3 Amostras dos minérios utilizados

As amostras utilizadas nos ensaios de flotação em escalas de bancada e piloto foram obtidas na usina de concentração da Arafertil.

As amostras foram coletadas no "underflow" da primeira deslamagem. Neste ponto do circuito o minério já foi submetido à moagem de barras, remoção da lama natural, moagem de bolas e classificação. A terceira deslamagem corresponde à separação do fino gerado ("overflow") da fração grossa ("underflow"), sendo esta última utilizada nos ensaios. Informações detalhadas do circuito de beneficiamento encontram-se no capítulo 4.

Para a realização dos ensaios de flotação em bancada (ensaios de condicionamento) foi amostrado o "underflow" da terceira deslamagem através de um amostrador já existente. Para a realização dos ensaios de flotação piloto foi montado um amostrador tipo cruzeta. Devido ao fato dos ensaios piloto serem realizados "on line" com a usina, a amostra era encaminhada por mangote para uma bomba centrífuga vertical (BM1) localizada no piso da usina. A partir da BM1 a polpa era transferida para a unidade piloto de flotação em coluna. A figura 6.11 mostra simplificada o esquema de obtenção da amostra de polpa para os ensaios piloto.

A caracterização do UD1 (alimentação da flotação) utilizado nos ensaios em bancada e piloto é mostrada na tabela 6.4 (média das várias pilhas).

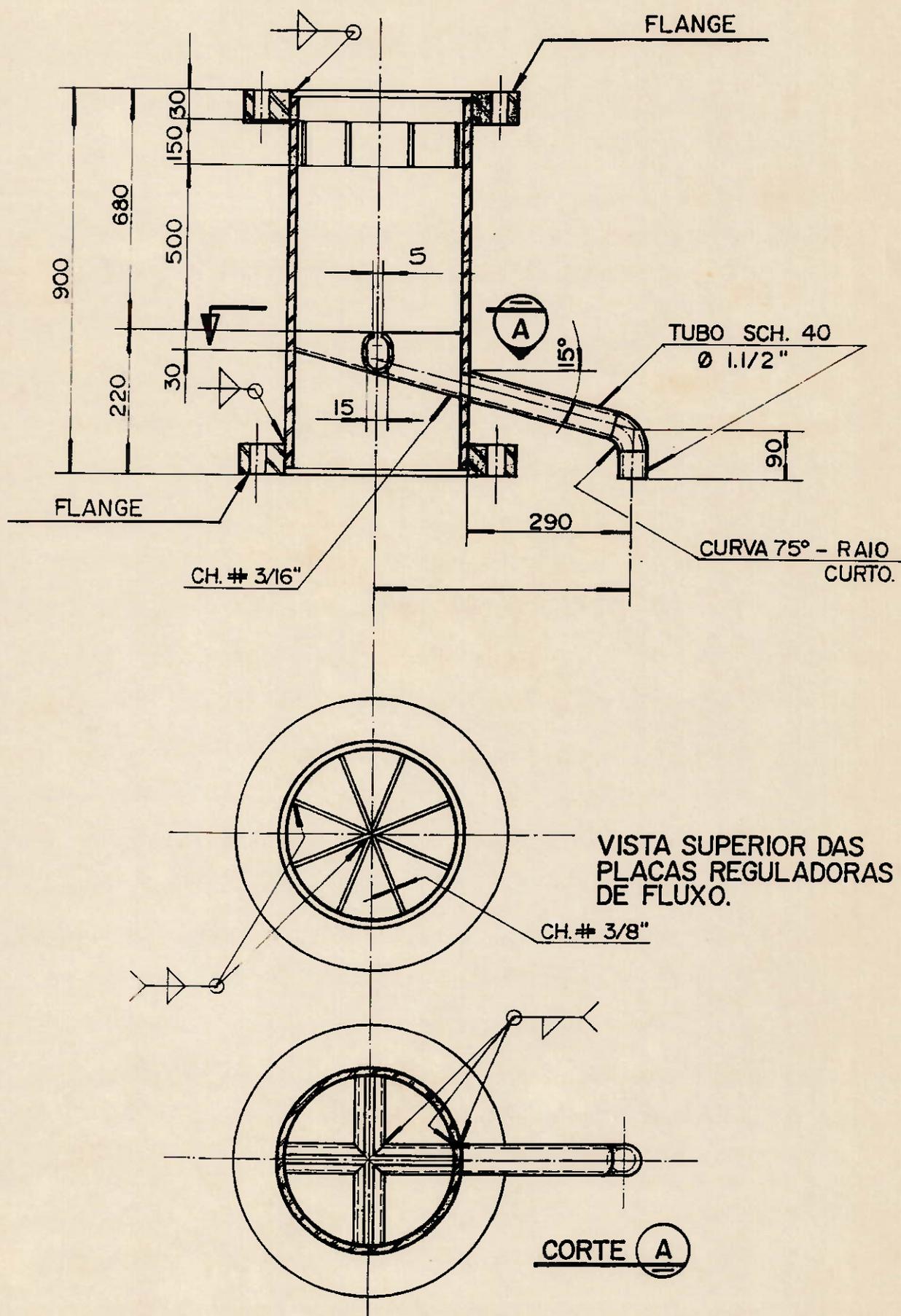


FIGURA 6.11 - ESQUEMA DE AMOSTRAGEM DO UD1

TABELA 6.4 - CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E GRANULOMÉTRICA DA ALIMENTAÇÃO DA COLUNA

MALHA TYLER	DETERMINAÇÕES (%)						% RETIDA	
	P ₂ O ₅	CaO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	MgO	BaSO ₄	SIMPLES	ACUMULADA
TALQUAL	20,77	26,46	18,20	9,57	0,49	8,50	-	-
65	19,71	27,68	14,80	18,76	0,65	3,26	16,22	16,22
100	22,39	30,26	16,19	10,88	0,45	4,84	14,94	31,16
150	20,58	26,81	19,19	8,76	0,52	8,18	18,97	50,13
200	20,34	25,65	19,56	8,36	0,54	8,97	9,42	59,55
270	19,55	24,20	20,26	7,39	0,52	10,57	13,19	72,44
325	19,45	23,86	19,62	6,71	0,50	11,24	5,31	78,05
400	19,60	24,05	19,41	6,29	0,43	11,73	5,96	84,01
-400	20,00	24,55	19,78	5,51	0,35	12,16	15,99	100,00
\bar{X}	20,34	26,33	18,34	9,70	0,50	8,37	100,00	-

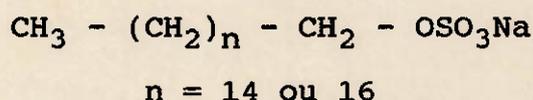
6.4 Reagentes utilizados

6.4.1 Características dos reagentes utilizados

Agrupando os reagentes de acordo com a sua atuação nos ensaios de flotação temos:

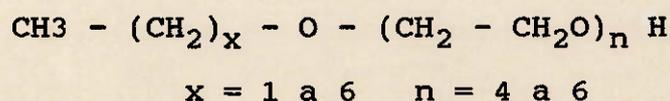
COLETOR DE BARITA

Utilizou-se o reagente Flotisor S72, fabricado pela Hoechst. Este reagente é um alquil sulfato de sódio obtido a partir de um álcool graxo sulfatado. É uma mistura aproximadamente equimolar de cetil e estearil sulfato de sódio (CESS), vendido na forma de uma pasta de cor branca a amarela clara com cerca de 25% de matéria ativa, sendo o restante praticamente água [99]. O reagente apresenta a seguinte fórmula química:



ESPUMANTE

Utilizou-se o reagente Flotanol D14, fabricado pela Hoechst. Este reagente é um eterpolialquilenoglicol obtido a partir de álcool propoxilado de cadeia curta [100]. O reagente apresenta cor amarelada com aspecto claro a opaco. Possui a seguinte fórmula química [101]:



O espumante possui a função de produzir espuma com grande quantidade de bolhas homogêneas de pequeno tamanho, proporcionando a estabilização do contato das interfaces: líquido/ar e líquido/sólido [102].

MODULADOR DE pH

Para o ajuste de pH na flotação utilizou-se hidróxido de sódio industrial.

Na preparação das pastilhas para análise no espectrômetro de fluorescência de raio-X utilizou-se ácido esteárico como aglomerante para eliminação de pó e melhor acabamento nas pastilhas.

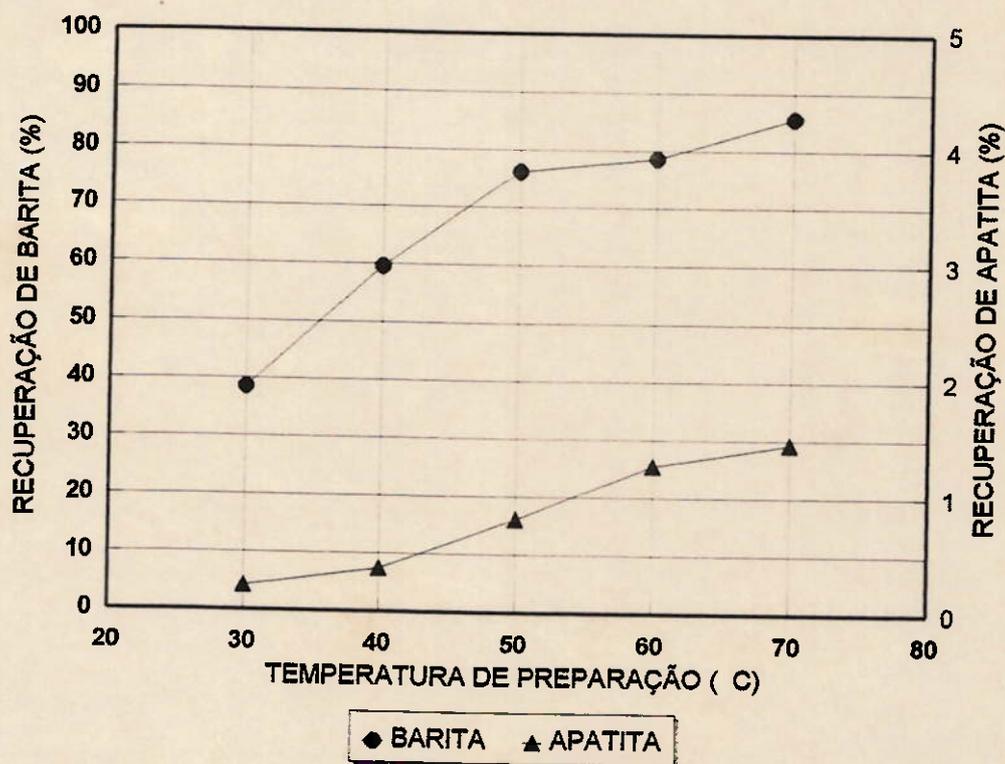
6.4.2 Preparação de reagentes

FLOTINOR S72

O coletor de barita (CESS) necessita de uma preparação prévia à sua dosagem no condicionador. No processo de preparação do CESS foi analisada a influência de três variáveis: temperatura da reação, concentração do coletor e tempo de preparação.

Para avaliar a influência destas três variáveis foram realizados ensaios de flotação em escala de bancada em célula mecânica (Wemco) [103].

Destas três variáveis a temperatura é a que apresenta maior influência, conforme é mostrado nas figuras 6.12, 6.13, 6.14 e 6.15. Ocorre aumento da recuperação de barita, com conseqüente diminuição do teor de $BaSO_4$ no não flotado, com



1 - EQUIPAMENTO: Célula Wemco - bancada

2 - CONDIÇÕES OPERACIONAIS

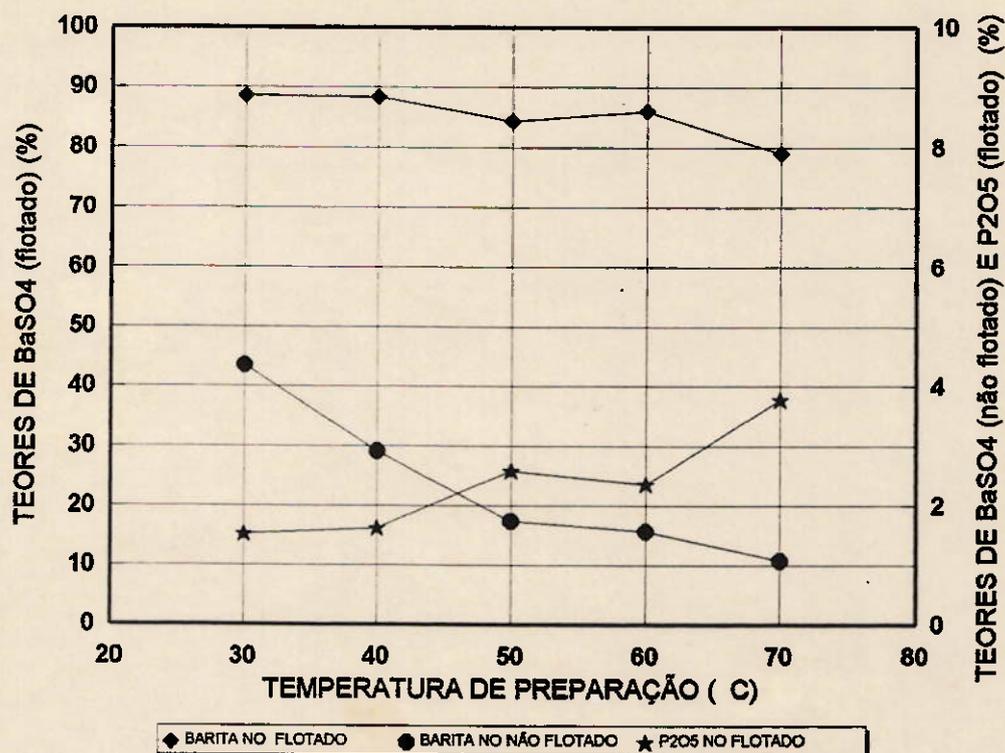
CONDICIONAMENTO

Porc. Sólidos = 20%
 pH = 8,5
 Tempo Cond. = 1 mim
 Coletor = Flotador S72
 Preparação = 6% - 3 mim
 Dosagem = 300 g/t
 Espumante = Flotanol D14
 Dosagem = 30 g/t

FLOTAÇÃO

Porc. Sólidos = 20%
 pH = 8,5
 Tempo = 2 mim (exaustão)

FIGURA 6.12 - INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DE PREPARAÇÃO DO CESS NA RECUPERAÇÃO [103]



1 - EQUIPAMENTO: Célula Wemco - bancada

2 - CONDIÇÕES OPERACIONAIS

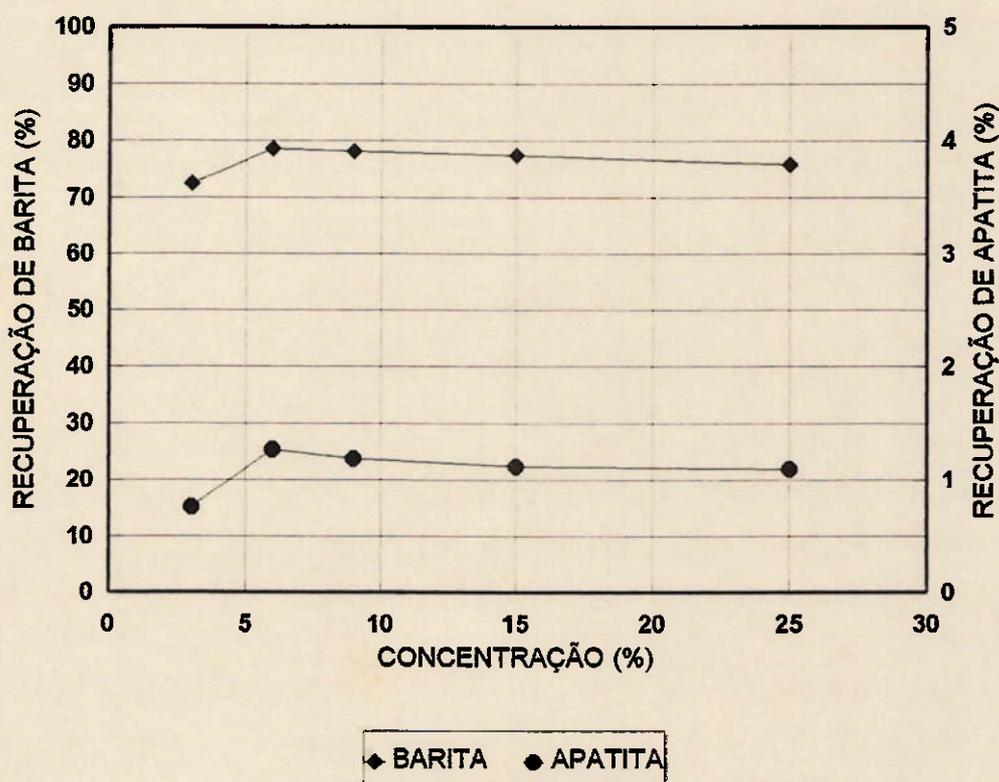
CONDICIONAMENTO

Porc. Sólidos = 20%
 pH = 8,5
 Tempo Cond. = 1 mim
 Coletor = Flotador S72
 Preparação = 60 C - 3 mim
 Dosagem = 300 g/t
 Espumante = Flotanol D14
 Dosagem = 30 g/t

FLOTAÇÃO

Porc. Sólidos = 20%
 pH = 8,5
 Tempo = 2 mim (exaustão)

FIGURA 6.13 - INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DE PREPARAÇÃO DO CESS NA SELETIVIDADE [103]



1 - EQUIPAMENTO: Célula Wemco - bancada

2 - CONDIÇÕES OPERACIONAIS

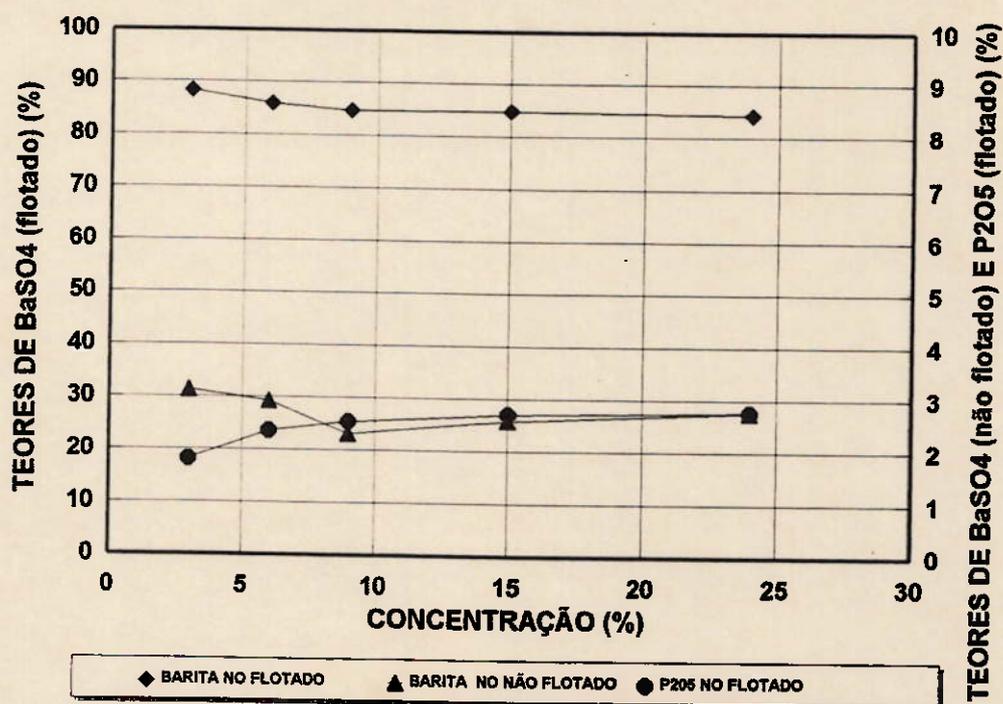
CONDICIONAMENTO

Porc. Sólidos = 20%
 pH = 8,5
 Tempo Cond. = 1 mim
 Coletor = Flotador S72
 Preparação = 60 C - 3 mim
 Dosagem = 300 g/t
 Espumante = Flotanol D14
 Dosagem = 30 g/t

FLOTAÇÃO

Porc. Sólidos = 20%
 pH = 8,5
 Tempo = 2 mim (exaustão)

FIGURA 6.14 - INFLUÊNCIA DA CONCENTRAÇÃO DE PREPARAÇÃO DO CESS NA RECUPERAÇÃO [103]



1 - EQUIPAMENTO: Célula Wemco - bancada

2 - CONDIÇÕES OPERACIONAIS

CONDICIONAMENTO

Porc. Sólidos = 20%
 pH = 8,5
 Tempo Cond. = 1 mim
 Coletor = Flotador S72
 Preparação = 6% - 3 mim
 Dosagem = 300 g/t
 Espumante = Flotanol D14
 Dosagem = 30 g/t

FLOTAÇÃO

Porc. Sólidos = 20%
 pH = 8,5
 Tempo = 2 mim (exaustão)

FIGURA 6.15 - INFLUÊNCIA DA CONCENTRAÇÃO DE PREPARAÇÃO DO CESS NA SELETIVIDADE [103]

o aumento de temperatura. A temperatura mínima de preparação é de 60 °C. Para temperaturas inferiores verifica-se dissolução parcial do coletor em água, havendo decantação após 10 min de sua preparação.

A utilização da concentração do coletor até 24% não apresentou influência na flotação (figuras 6.14 e 6.15) . A solução apresenta aumento de viscosidade com o aumento da concentração, limitando o seu valor no máximo a 6% em preparações industriais devido a possibilidade de agitação ineficiente.

O tempo mínimo de preparação gira em torno de 3 min, sendo esta conclusão obtida a partir de observação visual da dissolução do coletor na solução (tabela 6.5).

Portanto, a preparação em batelada do Flotisor S72 deve seguir as seguintes condições:

- . temperatura: 60°C mínimo,
- . concentração: 3 a 6%,
- . tempo: 3 min mínimo.

A preparação do coletor para os ensaios em escala piloto seguiu estes valores, obtidos a partir dos resultados de ensaios em célula mecânica.

FLOTANOL D14

O espumante não necessita de preparação prévia, sendo dosado puro.

TABELA 6.5 - INFLUÊNCIA DO TEMPO DE PREPARAÇÃO DO CESS

[103]

TEMPO (min)	OBSERVAÇÃO VISUAL
1	DISSOLUÇÃO PARCIAL
3	DISSOLUÇÃO TOTAL
5	DISSOLUÇÃO TOTAL
10	DISSOLUÇÃO TOTAL

HIDRÓXIDO DE SÓDIO

O hidróxido de sódio foi utilizado em solução de concentração igual a 10%, obtida a partir da diluição em água da soda 50%.

ÁCIDO ESTEÁRICO

Este reagente é dosado puro na forma de pó (PA), na preparação das pastilhas, na relação de 0,5 g por 30 g de amostra.

6.5 Análises químicas

Análises químicas foram realizadas no minério (UD1) e nos produtos dos ensaios de flotação (flotado e não flotado) pelo laboratório químico da Arafertil S. A..

Os elementos analisados foram: BaSO_4 , P_2O_5 e CaO . A determinação destes elementos foi feita por análise instrumental através de espectrômetro simultâneo de fluorescência de raio-X. A fonte geradora de raio-X é um tubo de ródio sendo utilizados detectores selados para a análise dos elementos citados.

Para as análises no espectrômetro de raio-X é necessária a prensagem prévia das amostras para a produção de pastilhas.

6.6 Equipamentos utilizados

Os principais equipamentos utilizados neste trabalho foram:

Preparação de amostras e análises químicas:

- . estufa com circulação de ar (Fabbe - modelo 170),
- . quarteador tipo Jones,
- . balança semi-analítica (Gehaka - modelo BG 4400),
- . moinho de anéis (Herzog),
- . prensa (Herzog - modelo HTP40),
- . espectrômetro simultâneo de fluorescência de raio-X (Philips - modelo PW/1606).

Análises granulométricas:

- . peneiras da série Tyler,
- . peneirador vibratório suspenso (via úmida),
- . estufa com circulação de ar (Fabbe - modelo 170),
- . balança semi-analítica (Gehaka - modelo BG 4400).

Preparação de reagentes:

- . balança semi-analítica (Gehaka - modelo BG 4400),
- . bécher de 600 ml,
- . agitador mecânico (Fisaton - modelo 713),
- . chapa aquecedora (Fisaton - modelo 702A),
- . termômetro com escala de 0 a 100 °C,
- . cronômetro digital (Technos Cronos),
- . seringa de 10 ml.

Ensaio de flotação em escala bancada:

- . bureta de 50 ml,
- . pH-metro (Metronal - modelo E120),
- . cronômetro digital (Technos Cronos),
- . célula de flotação Wemco com cuba de 2,6 l,

Ensaaios de flotação em escala piloto:

- . bomba centrífuga vertical (BM1),
- . tanque pulmão com sistema de agitação mecânica (TQ1),
- . condicionador com sistema de agitação mecânica (CN),
- . bomba centrífuga vertical (BM2),
- . tanque para diluição com sistema de agitação mecânica (TQ2),
- . coluna de flotação de diâmetro de 24" (61 cm) e altura total de 10,4 m,
- . sistema pneumático de controle de nível (Foxboro - modelo 456A),
- . bomba de deslocamento positivo - Nemo (Netzsch do Brasil - modelo 2 NE 15A) com variador de velocidade (Varimot - modelo PC A/M 1 cv),
- . rotâmetro para água com escala de 0 a 1 m³/h (Omel),
- . rotâmetro para ar com escala de 0 a 30 Nm³/h (Omel - modelo 4T8 1104Z),
- . manômetro com escala de 0 a 7 kgf/cm² (Proterma),
- . manômetro com escala de 0 a 2 kgf/cm² (Porterma),
- . bombas de pistão - dosagem de reagentes (Bran e Lubbe do Brasil - modelo NP 31),
- . bombas de pistão - dosagem de reagentes (Omel - modelo DMP 013),
- . baldes de plástico para transporte de reagentes e polpa (10 l).

Medida de porcentagem de sólidos:

- . proveta de 2.000 ml,
- . balança semi-analítica (Gehaka - modelo GB 4400).

Medida de vazões:

- . proveta de 2.000 ml,
- . balde de plástico de 10 l,
- . cronômetro digital (Technos Cronos),
- . balança semi-analítica.

Medida de pH:

- . pH-metro (Metronal - modelo E120).

7 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

7.1 Ensaaios com reagentes coletor, espumante e modulador de pH

7.1.1 Ensaaios de condicionamento

O bom desempenho da flotação está intrinsecamente relacionado com a preparação dos reagentes e o condicionamento destes com a polpa, previamente à alimentação da flotação. O condicionamento adquire importância especial quando o processo de flotação é realizado em coluna. O condicionamento de reagentes em sistemas de flotação em células mecânicas era realizado na própria célula, dando a falsa idéia que o condicionamento era desnecessário.

Para avaliar o efeito do condicionamento de espumante e coletor na flotação de barita foram realizados os seguintes ensaios:

- . ensaios de condicionamento e flotação em escala de bancada em célula mecânica (Wemco),
- . ensaios de condicionamento e flotação na unidade piloto de flotação em coluna.

Os ensaios em escala de bancada foram realizados primeiramente com dosagem simultânea de espumante e coletor. Verificou-se que ocorre diminuição da recuperação de barita, com conseqüente melhoria de seletividade, com o

aumento do tempo de condicionamento dos reagentes. Este fato torna-se crítico a partir de 10 min [104]. A flotação sem condicionamento apresentou uma pequena tendência de maior perda de apatita na fração flotada, conforme mostrado na figura 7.1.

Nestes ensaios foi verificada mudança no comportamento da espuma com o aumento do tempo de condicionamento. A espuma se tornava cada vez menos consistente e instável. Devido a este fato foram realizados ensaios com variação do tempo de condicionamento do coletor (Flotisor S72) e dosagem do espumante na célula de flotação (tempo de condicionamento nulo). Estes ensaios mostraram uma menor perda de barita sendo que a perda de recuperação de barita começou a ocorrer somente entre 10-15 min de condicionamento, não sendo tão acentuada como nos ensaios anteriores. Os resultados destes ensaios são mostrados na figura 7.2.

Devido ao fato dos ensaios terem sido realizados em célula mecânica (Wemco) com considerável nível de agitação (assemelhando-se a um tanque agitado), o tempo nulo de condicionamento na realidade não ocorre, pois a polpa é condicionada na própria célula de flotação. Este fato mostra que o espumante deve apresentar o mínimo tempo de condicionamento possível, o suficiente para a sua mistura com a polpa.

O coletor já apresenta comportamento diferente devendo ser condicionado em tempos pequenos, máximo 10-15 min em escala de bancada.

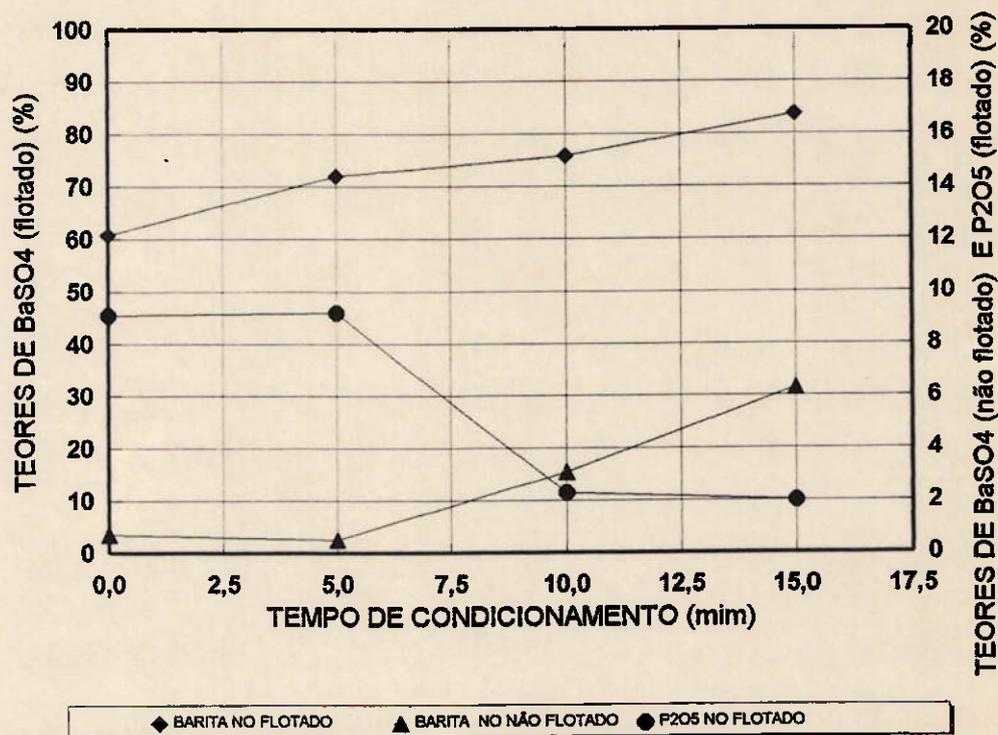
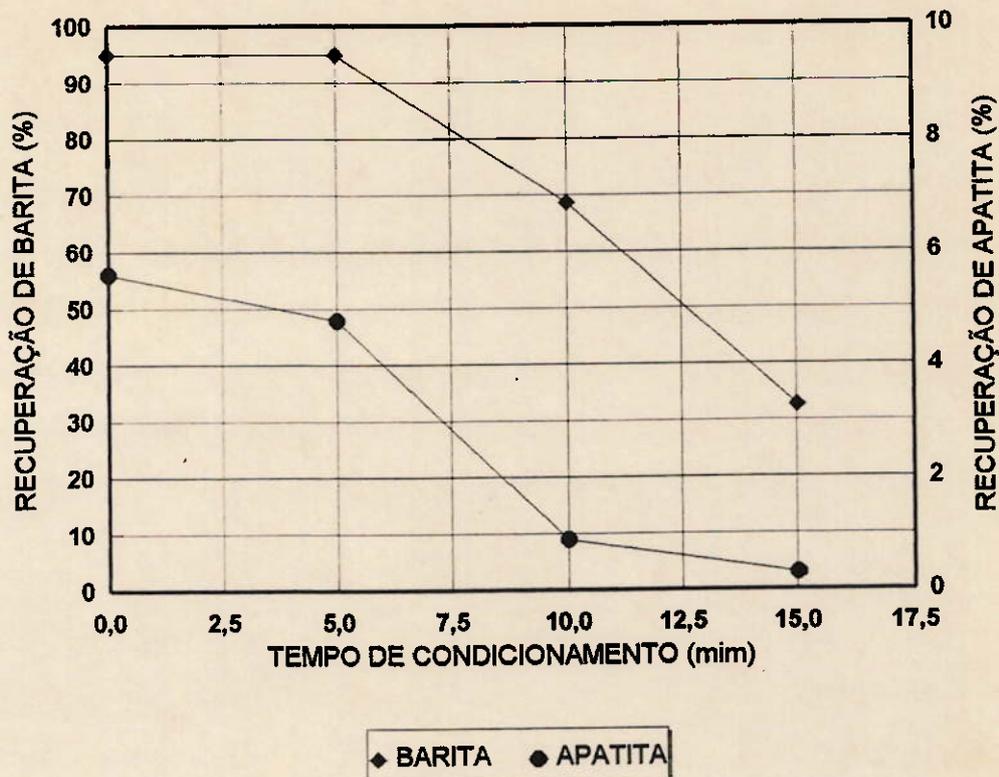


FIGURA 7.1 - INFLUÊNCIA DO TEMPO DE CONDICIONAMENTO DO ESPUMANTE E DO COLETOR NA FLOTAÇÃO DE BARITA (ESCALA DE BANCADA)

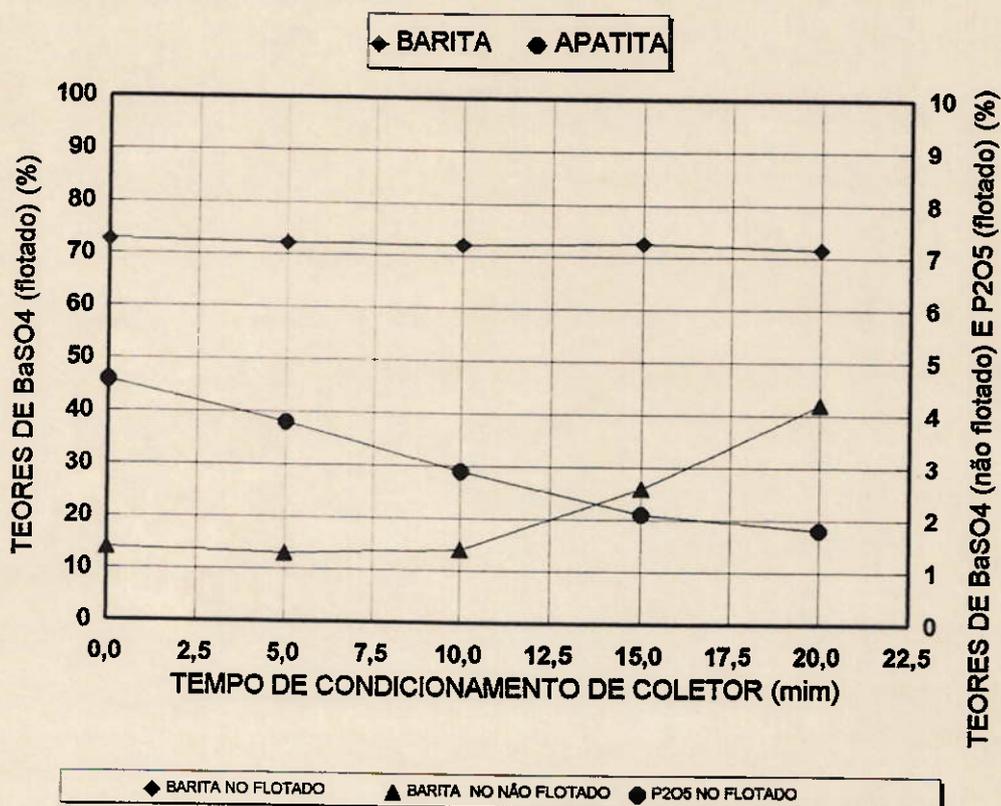
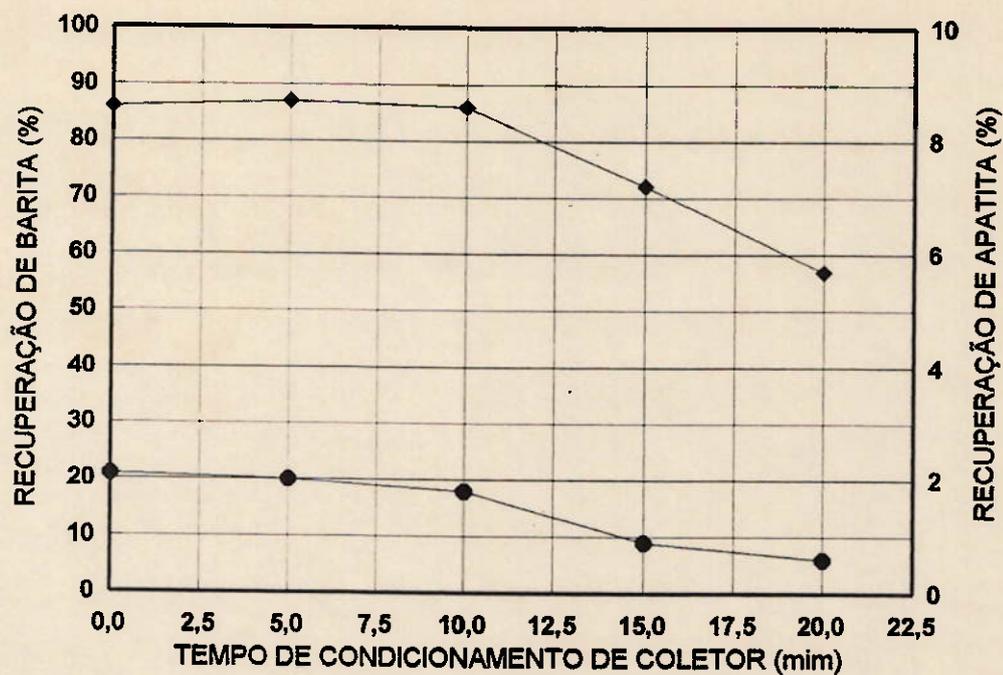


FIGURA 7.2 - INFLUÊNCIA DO TEMPO DE CONDICIONAMENTO DO COLETOR NA FLOTAÇÃO DE BARITA (ESCALA DE BANCADA)

Devido à importância que o condicionamento dos reagentes apresentaram na escala de bancada este efeito foi também avaliado na unidade piloto de flotação em coluna.

Na unidade piloto de flotação em coluna a variação do tempo de condicionamento ocorreu pela mudança do local de adição dos reagentes. O melhor resultado obtido foi através da adição simultânea de espumante e coletor na caixa de bomba (BM2), que transfere a polpa ao tanque de diluição, fornecendo 5,2 minutos de condicionamento para os reagentes. Estes resultados são mostrados nas figuras 7.3 e 7.4.

O aumento do tempo de condicionamento do espumante para 10,4 min proporcionou diminuição significativa da recuperação de barita. O aumento do tempo de condicionamento do coletor para 10,4 min afetou muito pouco a flotação. Estes resultados comprovaram os obtidos em escala de bancada.

A partir destes ensaios podemos fazer as seguintes considerações:

- . é necessário que ocorra a mistura dos reagentes (espumante e coletor) previamente à flotação de barita em coluna de flotação,
- . o condicionamento do espumante (Flotanol D14) não deve ultrapassar cerca de 5 min em escala contínua,
- . o coletor não deve ser condicionado por tempos superiores a 10 min em escala contínua, pois provoca queda de recuperação de barita,

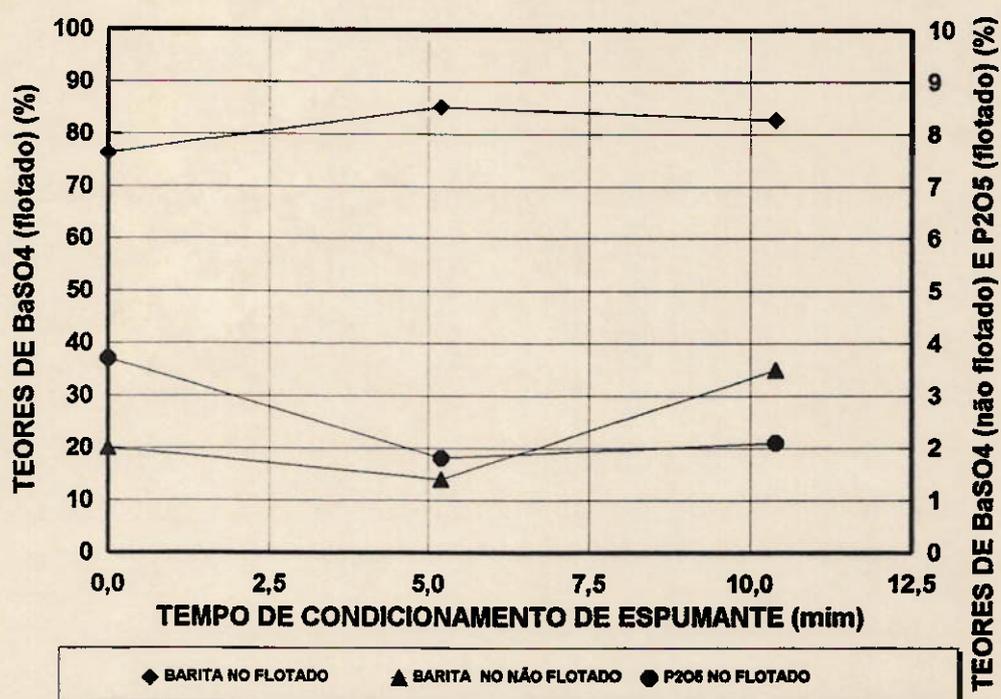
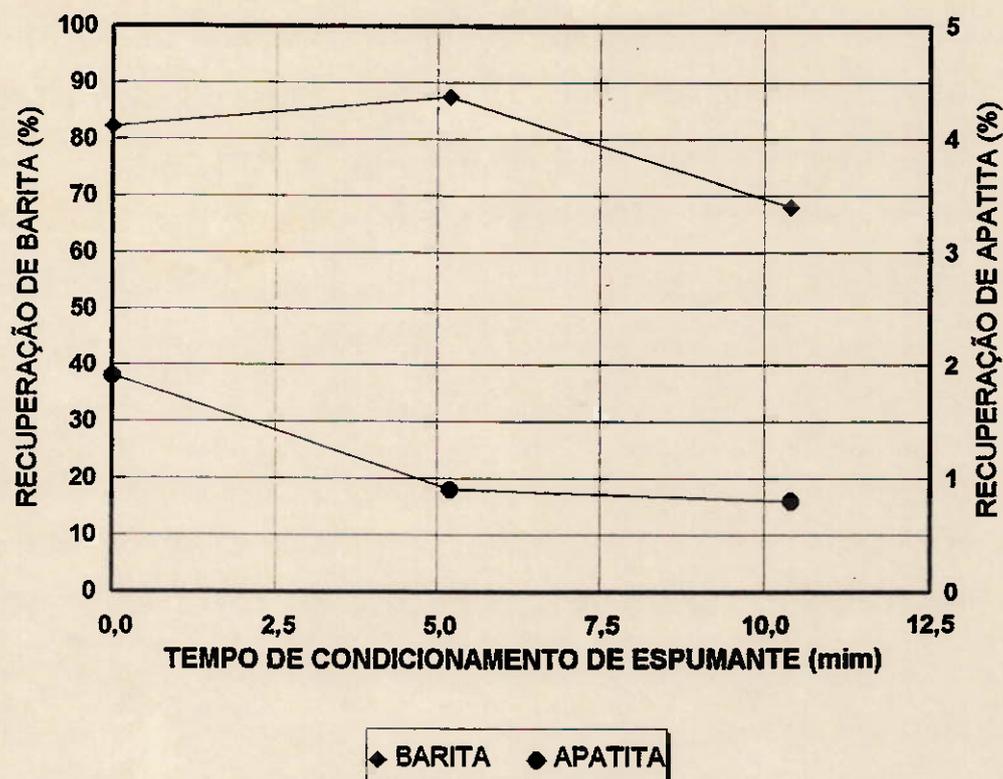


FIGURA 7.3 - INFLUÊNCIA DO TEMPO DE CONDICIONAMENTO DO ESPUMANTE NA FLOTAÇÃO DE BARITA

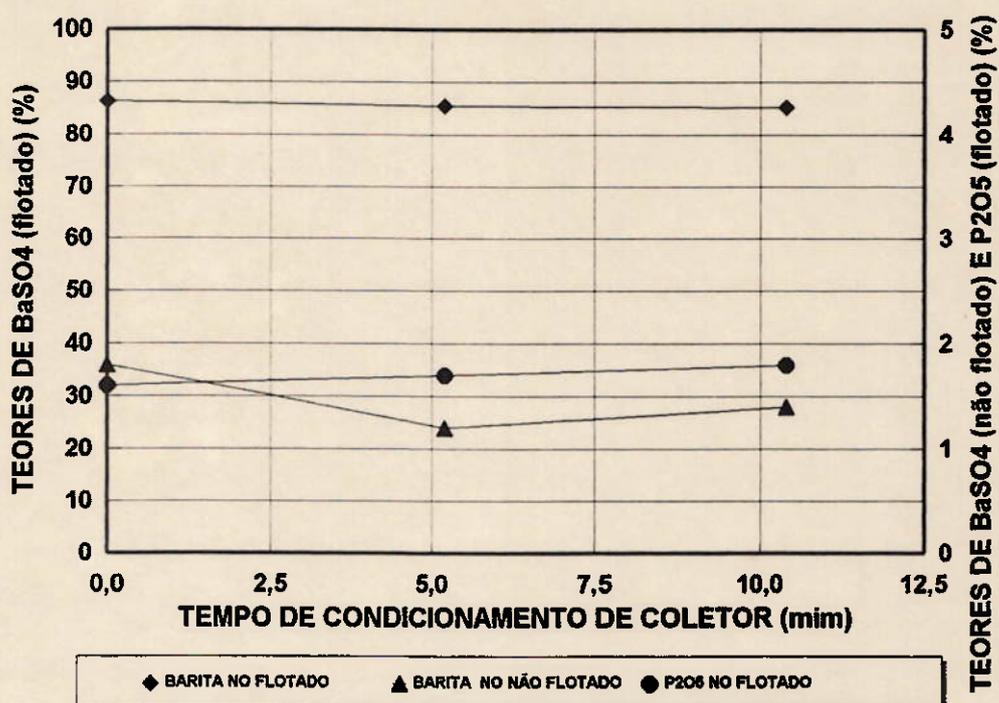
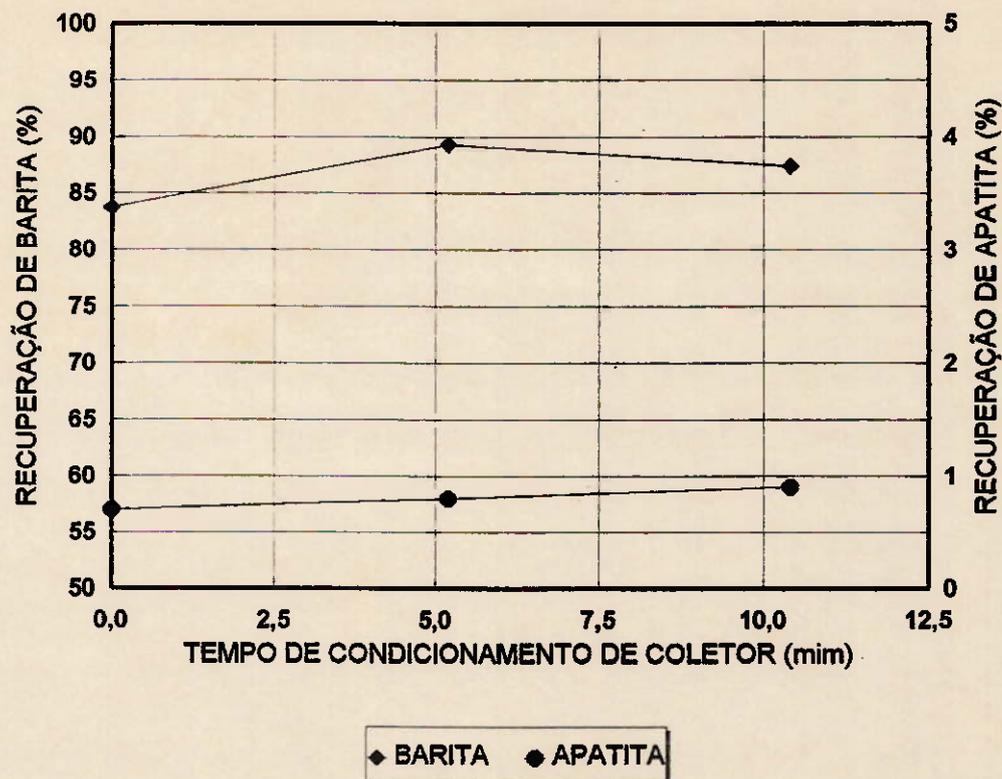


FIGURA 7.4 - INFLUÊNCIA DO TEMPO DE CONDICIONAMENTO DO COLETOR NA FLOTAÇÃO DE BARITA

- . o efeito deletério do condicionamento de reagentes em tempos superiores aos citados acima é mais significativo para o espumante que para o coletor,
- . o efeito do condicionamento dos reagentes por tempos elevados foi mais evidenciado nos ensaios de bancada, devido ao fato de também ocorrer condicionamento dentro da própria célula de flotação (Wemco), devido à sua intensa agitação.

Tendo-se em vista as considerações acima, decidiu-se pela dosagem dos reagentes (espumante e coletor) na caixa de bomba (BM2), proporcionando um tempo de condicionamento de cerca de 4 a 5 minutos no tanque diluidor. Este valor apresenta algumas variações devido às mudanças de taxa de alimentação e porcentagem de sólidos da alimentação da coluna, contudo sem atingir tempos de condicionamento que pudessem comprometer o desempenho da flotação.

As tabelas dos ensaios encontram-se no apêndice 2.

7.1.2 Influência da dosagem de espumante, coletor e modulador de pH

Os ensaios de flotação de barita para avaliar a influência da dosagem de reagentes foram realizados na unidade piloto de flotação em coluna.

Os reagentes utilizados, bem como a sua preparação estão descritos nos itens 6.4.1 e 6.4.2.

Os ensaios para avaliar a influência da dosagem de espumante e coletor foram realizados em três etapas:

- . variação da dosagem do espumante (17 a 71 g/t) e coletor (53 a 230 g/t) com relação constante entre os mesmos (espumante/coletor = 0.30),
- . variação da dosagem do espumante (16 a 120 g/t) com dosagem constante do coletor (120 g/t), ocorrendo conseqüentemente a variação na relação/espumante coletor (0,13 a 1,00),
- . variação da dosagem do coletor (35 a 303 g/t) com dosagem constante do espumante (37 g/t), ocorrendo conseqüentemente variação na relação espumante/coletor (0,12 a 1,06).

Os primeiros ensaios foram realizados mantendo-se a dosagem de espumante em torno de 30 % em relação à dosagem de coletor. O aumento da dosagem do coletor (conseqüentemente do espumante) proporcionou aumento da recuperação de barita e perda de apatita no flotado conforme mostrado na figura 7.5. Obteve-se resultado satisfatório com dosagem de espumante em 33 g/t e coletor em 110 g/t com recuperação de barita em 88,8 % e perda de apatita em 1,8 %. Neste ensaio o teor de barita na fração não flotada foi de 1,5 % proporcionando condição de seletividade na flotação de apatita posterior.

Utilizando-se a dosagem do coletor em 120 g/t foram realizados ensaios para avaliar a influência da dosagem do espumante, sendo este variado de 16 a 120 g/t.

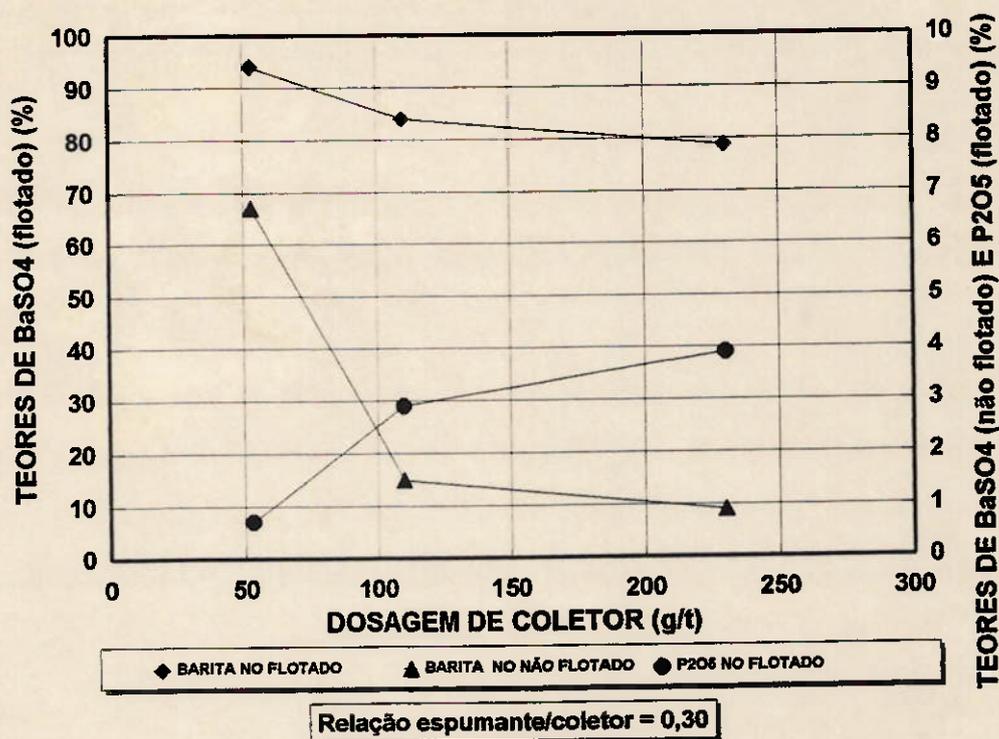
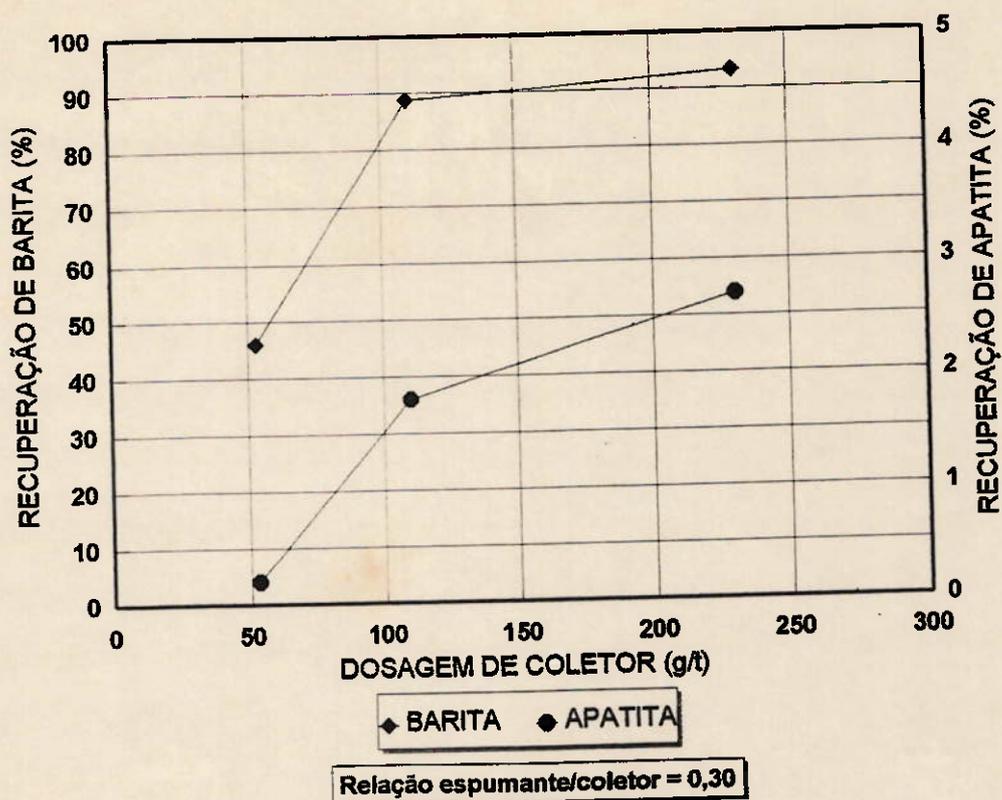


FIGURA 7.5 - INFLUÊNCIA DA DOSAGEM DE ESPUMANTE E COLETOR (RELAÇÃO FIXA) NA FLOTAÇÃO DE BARITA

A dosagem de espumante apresentou uma faixa ótima de dosagem entre 35 e 70 g/t, onde ocorreu máximo de recuperação de barita com baixa perda de apatita (1,2 a 1,3 %).

A falta e o excesso de espumante prejudicaram a recuperação da flotação. A utilização de baixa dosagem de espumante proporcionou espuma desmineralizada com bolhas de grande tamanho, enquanto o excesso de espumante provocou perda na nitidez da interface polpa-espuma, chegando-se a obter espuma no rejeito.

Os resultados obtidos (figura 7.6) mostram que uma dosagem de espumante em torno de 35 g/t proporciona bons resultados, com recuperação de barita em torno de 90 %, perda de apatita de 1,0 a 1,5 %, obtendo-se teor de BaSO_4 de 1,2 % no rejeito. Este resultado é praticamente o mesmo obtido com a pilha anterior (pilha 2585), sugerindo serem estas condições próximas ao ponto ótimo de operação.

Utilizando-se dosagem de espumante em 37 g/t foram realizados ensaios para avaliar o efeito da dosagem do coletor. Dosagem de coletor abaixo de 100 g/t provocou diminuição da recuperação de barita com teores de BaSO_4 no rejeito maior que 2 % (acima do desejado para flotação de apatita). Alta dosagem de coletor (300 g/t) proporcionou aumento da recuperação de barita até 97 %, contudo com perda de apatita em torno de 2 %. O melhor resultado foi obtido com dosagem de coletor em torno de 100 g/t (figura 7.7).

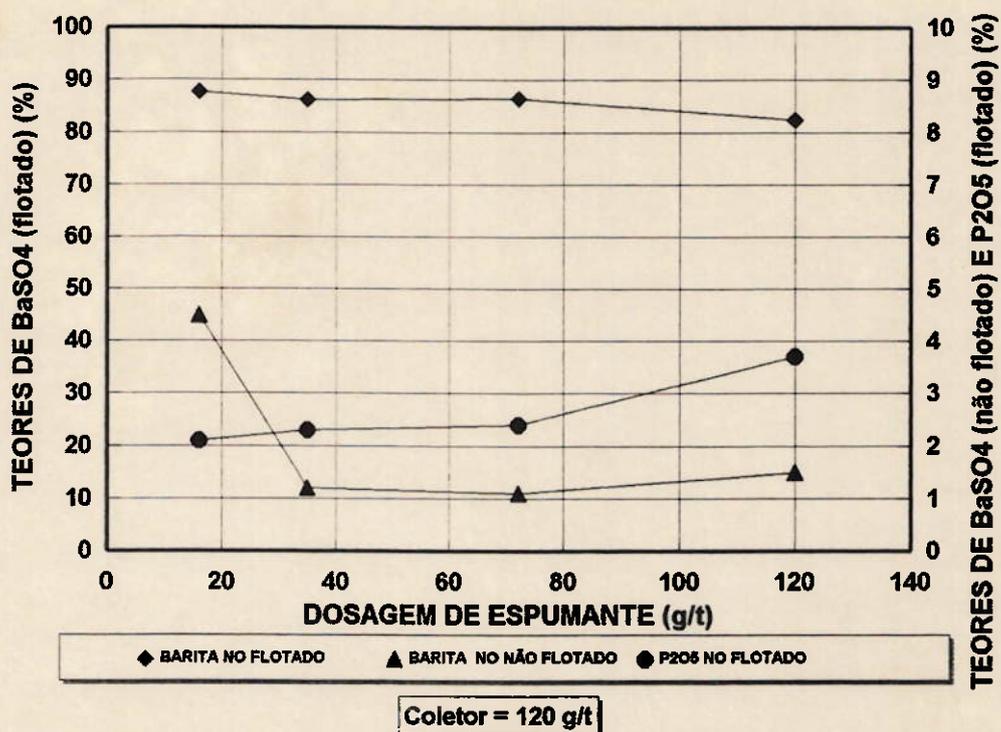
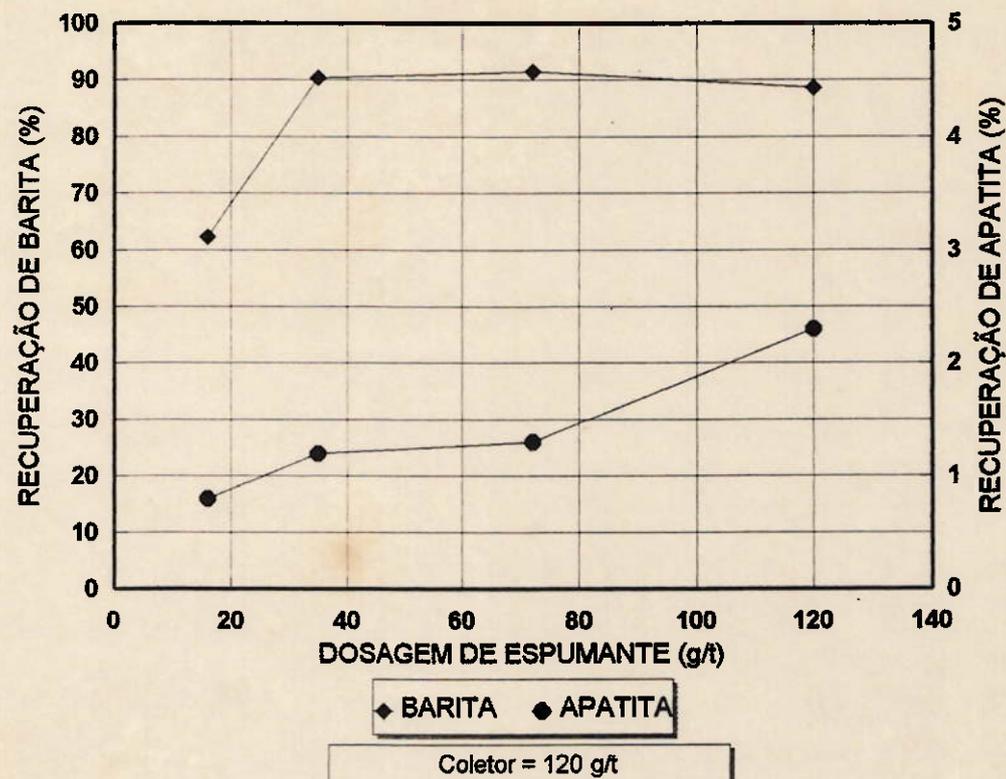


FIGURA 7.6 - INFLUÊNCIA DA DOSAGEM DE ESPUMANTE NA FLOTAÇÃO DE BARITA

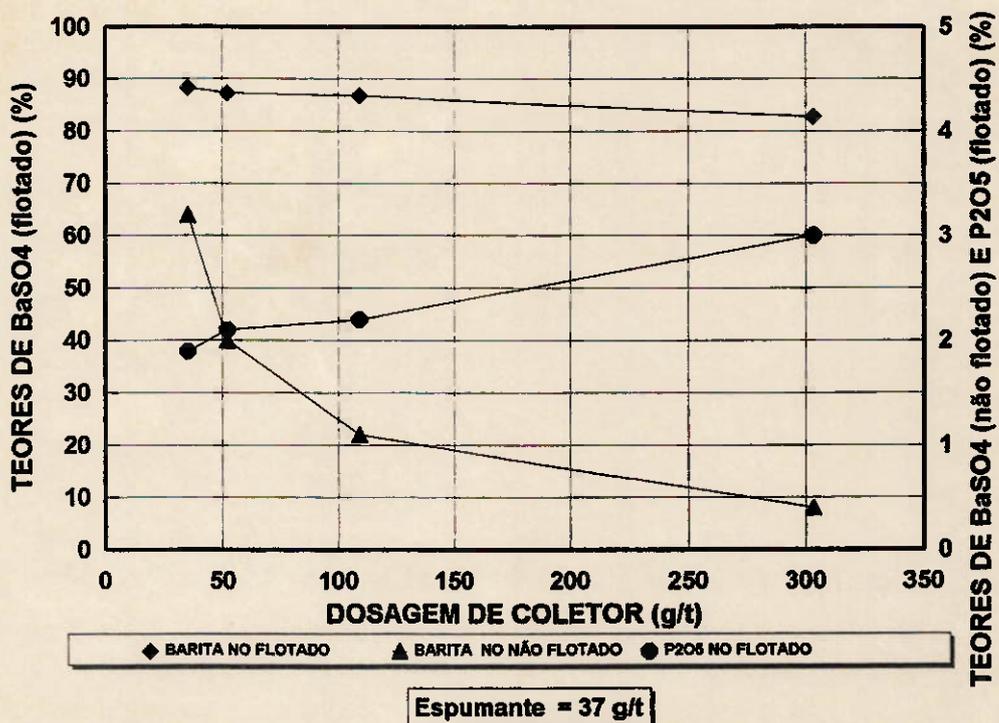
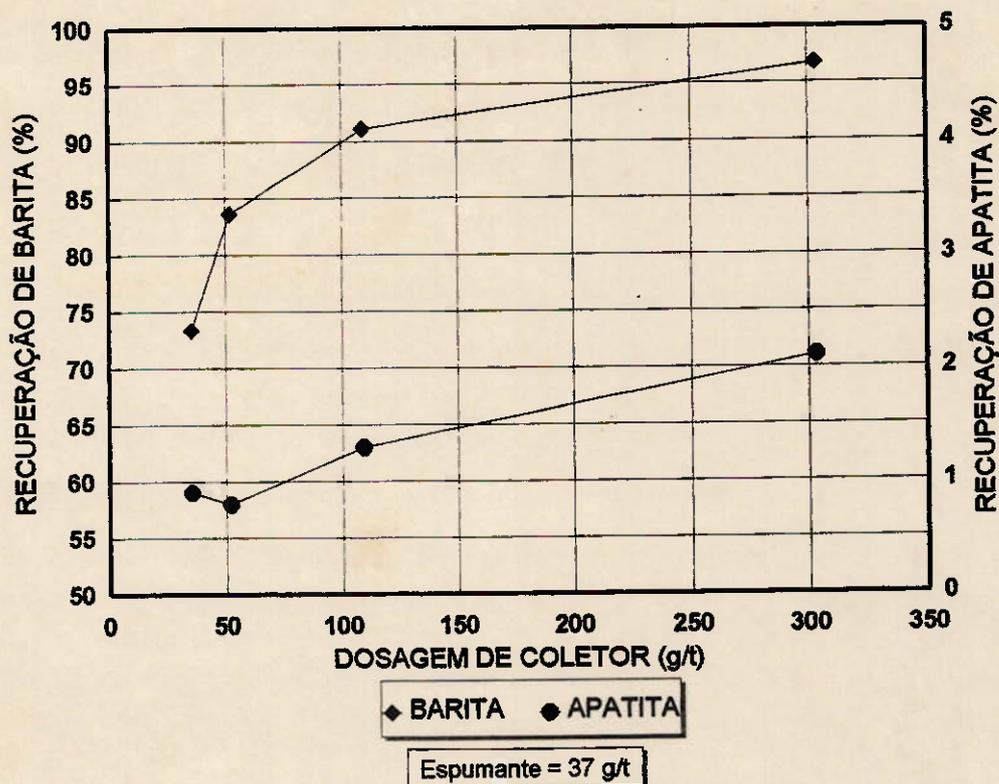


FIGURA 7.7 - INFLUÊNCIA DA DOSAGEM DE COLETOR NA FLOTAÇÃO DE BARITA

Os ensaios anteriormente analisados foram realizados em condições fixas em termos de taxa de alimentação, condicionamento e flotação.

As condições de realização dos ensaios são mostradas a seguir:

. alimentação	= 3,3 a 3,7 t/h
. condicionamento	
porcentagem de sólidos	= 48 a 50 %
pH	= 9,5
espumante	= Flotanol D14
coletor	= Flotisor S72
. flotação	
porcentagem de sólidos	
alimentação	= 48 a 50 %
flotado	= 41 a 43 %
não flotado	= 38 a 40 %
aerador	
velocidade do ar	= 1,2 cm/s
pressão	= 4,5 kgf/cm ²
água de lavagem	= 0,16 cm/s
camada de espuma	= 40 cm

As tabelas apresentando os ensaios acima citados encontram-se no apêndice 3.

O necessidade de variação na dosagem de coletor e espumante ocorre de acordo com as características do minério (principalmente teor de BaSO₄ na alimentação da flotação) e

da qualidade desejada no concentrado de apatita que exige maior ou menor recuperação de barita.

Utilizando-se as condições operacionais citadas acima foram realizados ensaios de flotação na unidade piloto com o objetivo de comparar o consumo de espumante e coletor na coluna de flotação (um estágio) comparativamente ao consumo da unidade industrial com célula mecânica (circuito "rougher-scavenger").

Verificou-se na análise de 11 pilhas diferentes que a dosagem de espumante (25 a 40 g/t) e coletor (90 a 150 g/t) sempre foi menor que a utilizada na unidade industrial para uma mesma faixa de recuperação de barita (80 a 85 %). O consumo de espumante na coluna de flotação ficou em média 20 % inferior enquanto o de coletor foi, em média, 25 % inferior ao consumo da unidade industrial com células mecânicas (tabela 7.1).

Após a definição dos níveis de dosagem de espumante e coletor foram realizados ensaios com o objetivo de avaliar a influência do pH de condicionamento na flotação de barita utilizando-se soda como modulador. O aumento do pH de 7,5 até 10,0 promove aumento na recuperação de barita enquanto que para valores de pH acima de 10,0 ocorre perda da recuperação de barita (figura 7.8). O pH em torno de 9,5 apresentou bons resultados de recuperação de barita (87 %) e pequena perda de apatita (1,4 %) com baixo consumo de soda.

A tabela contendo os resultados dos ensaios de variação do pH de condicionamento encontra-se no apêndice 3.

**TABELA 7.1 - COMPARAÇÃO DO CONSUMO DE ESPUMANTE E COLETOR
ENTRE A COLUNA PILOTO DE FLOTAÇÃO E O CIRCUITO
INDUSTRIAL DE CÉLULAS MECÂNICAS**

PILHA (n ^o)	MECÂNICA (g/t)		COLUNA (g/t)		REL. (M/C)	
	ESPUM.	COLETOR	ESPUM.	COLETOR	ESPUM.	COLETOR
2588	60	250	35	150	0,58	0,60
2593	50	100	26	87	0,58	0,60
2595	39	139	37	110	0,95	0,79
2596	40	141	38	110	0,95	0,78
2597	39	172	35	115	0,90	0,67
2599	51	133	33	98	0,65	0,74
2601	54	142	38	115	0,70	0,81
2602	47	140	37	117	0,79	0,84
2604	47	190	37	116	0,79	0,84
2608	27	157	25	145	0,93	0,92
2615	31	172	25	130	0,81	0,76

NOTA:

A comparação de consumo de reagentes foi realizada a partir de resultados metalúrgicos similares (recuperação de barita = 80-85%) na unidade piloto de flotação em coluna e a unidade industrial com células mecânicas.

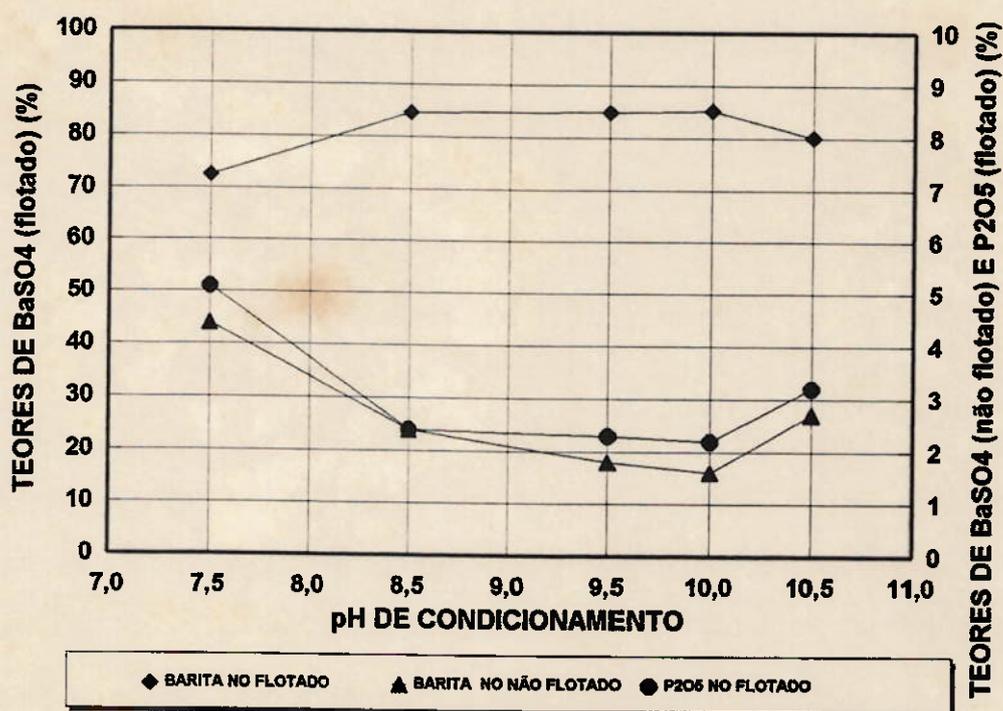
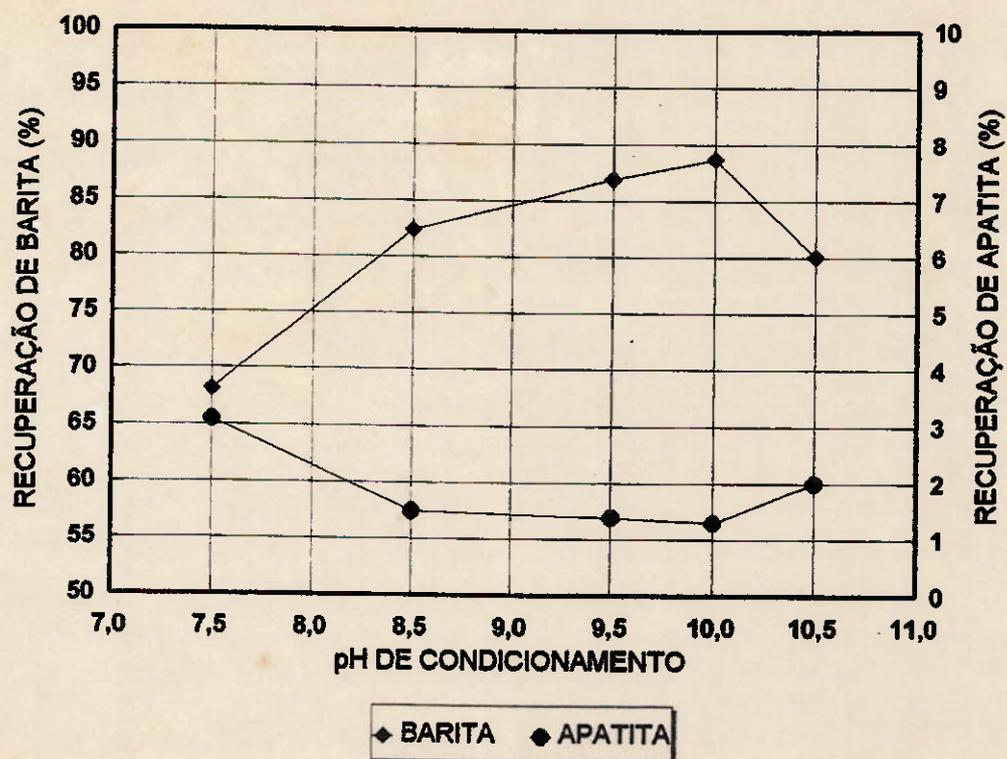


FIGURA 7.8 - INFLUÊNCIA DO pH DE CONDICIONAMENTO NA FLOTAÇÃO DE BARITA

Tendo-se em vista os resultados obtidos, o sistema de reagentes da flotação de barita apresenta a seguinte condição otimizada:

- . espumante : 30 a 40 g/t (Flotanol D14)
- . coletor : 100 a 140 g/t (Flotisor S72)
- . pH de condicionamento: 9,5

7.2 Influência das variáveis operacionais e das relacionadas com o equipamento

Após a determinação dos níveis ótimos de dosagem de espumante, coletor e pH foram realizados os ensaios com o objetivo de avaliar a influência de variáveis relacionadas com a coluna de flotação (velocidade do ar, velocidade da água de chuveiro e altura da camada de espuma) e de variáveis operacionais (porcentagem de sólidos, taxa de alimentação, altura da zona de recuperação e ensaios cinéticos).

Os ensaios foram realizados variando-se a variável em estudo, mantidas as demais fixas. As tabelas dos resultados encontram-se no apêndice 3.

7.2.1 Velocidade do ar

Os ensaios para avaliar a influência da velocidade do ar foram realizados variando-se a vazão de ar do aerador

controlando a pressão em $4,5 \text{ kgf/cm}^2$ pela vazão de água do aerador.

A utilização de velocidade do ar em torno de $0,6 \text{ cm/s}$ proporcionou baixa recuperação de barita, enquanto que na faixa de $0,9$ a $1,2 \text{ cm/s}$ obteve-se o máximo de recuperação de barita (89%) com baixa perda de apatita ($1,1 \%$). A velocidade do ar acima de $1,2 \text{ cm/s}$ provocou queda na recuperação de barita com conseqüente aumento de BaSO_4 no não flotado (figura 7.9). A queda da recuperação deveu-se principalmente à perda da nitidez da interface polpa espuma e ao aumento do tamanho das bolhas causado pela coalescência das mesmas.

Os ensaios para otimização da dosagem dos reagentes foram realizados em velocidade do ar em $1,2 \text{ cm/s}$, dentro portanto da faixa ótima.

7.2.2 Velocidade da água de chuveiro

Os ensaios para avaliar a influência da velocidade da água de chuveiro foram realizados a partir da variação da vazão da água de chuveiro.

A faixa de velocidade da água de chuveiro utilizada nos ensaios foi de 0 a $0,31 \text{ cm/s}$. A seletividade máxima ocorreu em torno de $0,16$ a $0,23 \text{ cm/s}$, enquanto que valores abaixo e acima apresentaram menor teor de BaSO_4 no flotado. A recuperação apresentou um comportamento similar; com recuperação de BaSO_4 em torno de 90% na mesma faixa.

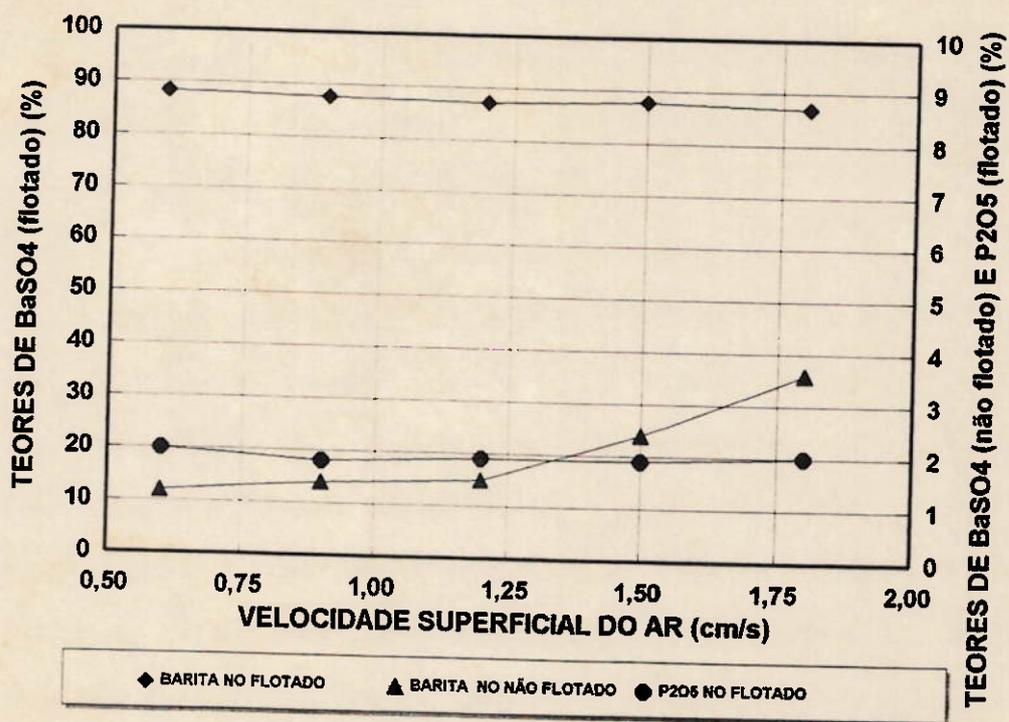
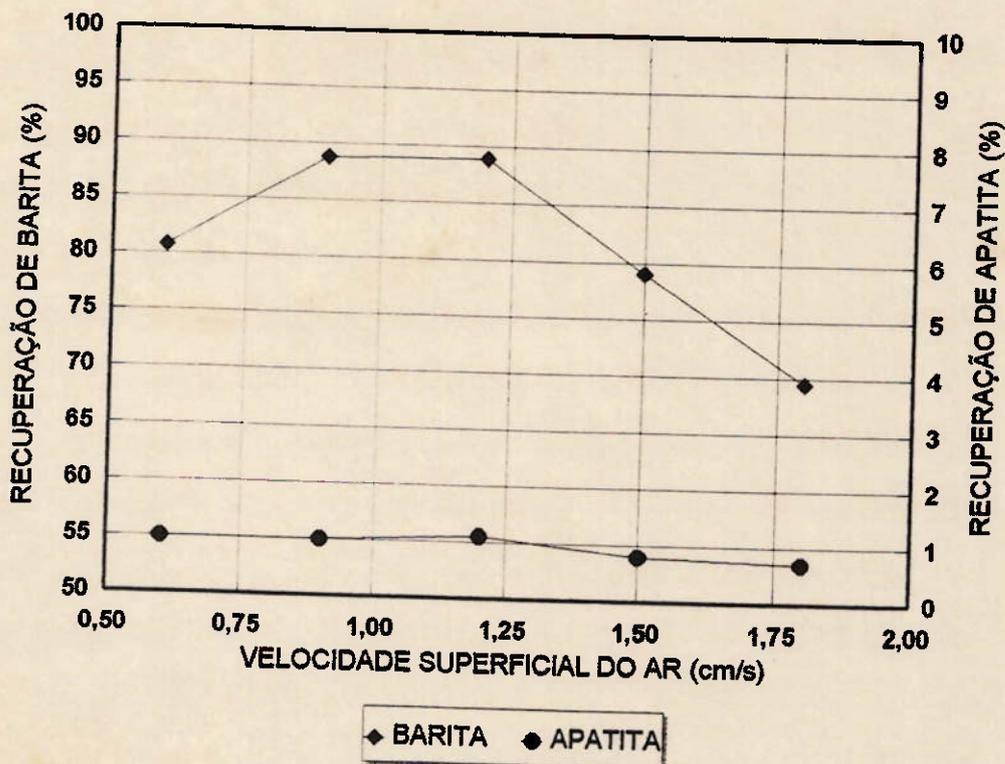


FIGURA 7.9 - INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DO AR NA FLOTAÇÃO DE BARITA

A ausência de água de chuva, bem como a utilização de baixa velocidade de água de lavagem dificultou o transbordo do concentrado de barita pela falta de drenagem na espuma. A utilização de água de lavagem em torno de 0,30 cm/s provocou excessiva turbulência na espuma, chegando até mesmo a destruí-la pela ação mecânica da água.

A velocidade da água de lavagem atuou na limpeza da camada de espuma, sendo possível obter concentrado com teor de CaO em torno de 2,5%, minimizando a perda de apatita (1,0%).

A figura 7.10 mostra o efeito da velocidade da água de chuva na flotação de barita.

Os ensaios para otimização da dosagem dos reagentes foram realizados em velocidade da água de chuva em 0,16 cm/s, dentro portanto da faixa ótima.

7.2.3 Altura da camada de espuma

Os ensaios para avaliar a influência da altura da camada de espuma foram realizados a partir da atuação na vazão de rejeito da coluna de flotação através do controle de nível. Os ensaios foram realizados com variação da altura da camada de espuma de 20 a 100 cm. Quanto maior a altura da camada de espuma mais seletivo foi o processo de flotação, tendo o teor de BaSO_4 aumentado de 84,8 % a 87,1 % com o aumento da camada de espuma de 20 a 100 cm. Contudo, houve um efeito muito acentuado de perda de recuperação com o aumento da camada de espuma. Ocorreu significativa queda de recuperação para valores superiores a 40 cm para a camada de espuma, chegando até mesmo a valores extremamente baixos

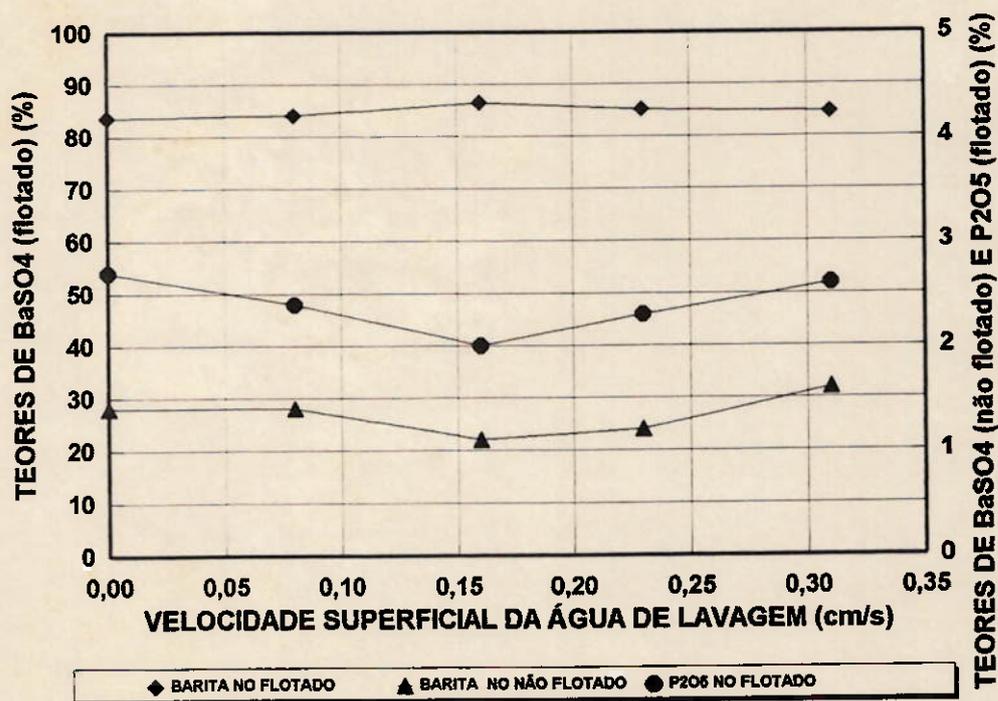
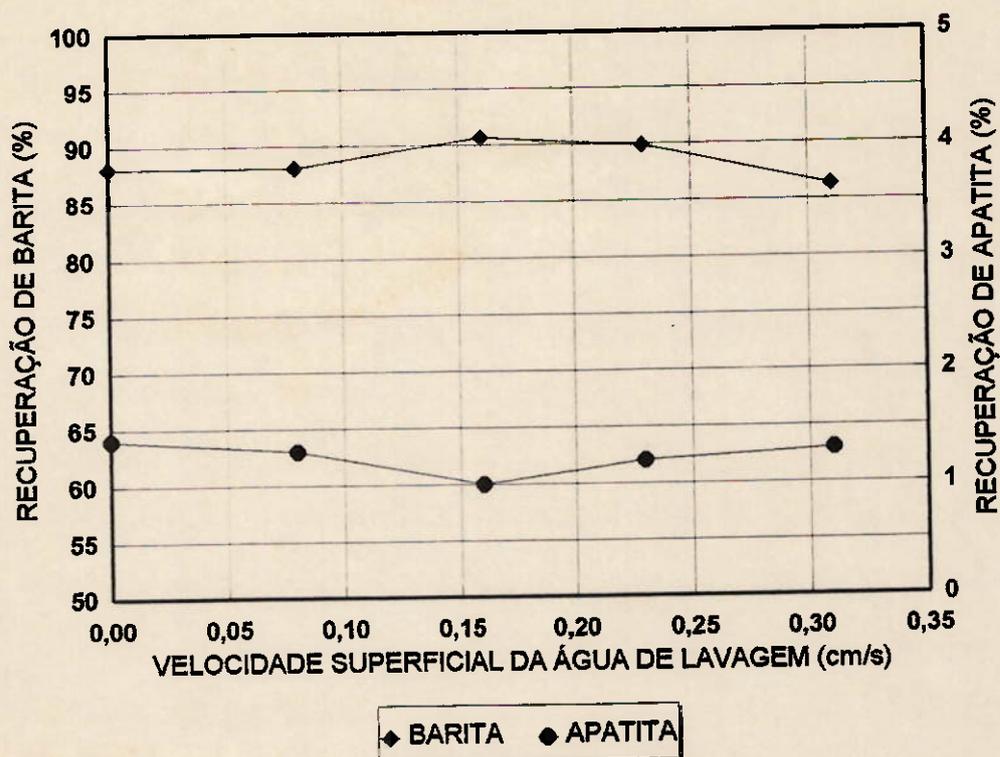


FIGURA 7.10 - INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DA ÁGUA DE CHUVEIRO NA FLOTAÇÃO DE BARITA

de recuperação de barita (16,6 %) com a camada de espuma em 100 cm. Esta queda de recuperação se deve ao fato da dificuldade de transbordo da espuma para grandes camadas de espuma, tendo-se em vista não ocorrer sustentação da espuma, sendo esta relativamente frágil e menos mineralizada.

A camada de espuma menor que 40 cm não apresentou efeitos significativos na flotação. O valor ótimo para a altura da camada de espuma está em torno de 30-40 cm para garantir boa recuperação de barita, facilidade de controle e atuação do chuveiro submerso na espuma.

A figura 7.11 mostra o efeito da altura da camada de espuma na flotação de barita.

Os ensaios para otimização da dosagem dos reagentes foram realizados com 40 cm para a altura da camada de espuma, dentro portanto da faixa ótima.

Tendo-se em vista os resultados obtidos, as variáveis relacionadas com a coluna de flotação apresentam a seguinte condição otimizada:

- . velocidade do ar : 0,9 a 1,2 cm/s
- . velocidade da água de chuveiro: 0,16 a 0,23 cm/s
- . altura da camada de espuma : 40 cm (máximo)

7.2.4 Porcentagem de sólidos

Os ensaios para a avaliação da porcentagem de sólidos foram realizados a partir da adição de água no tanque de diluição.

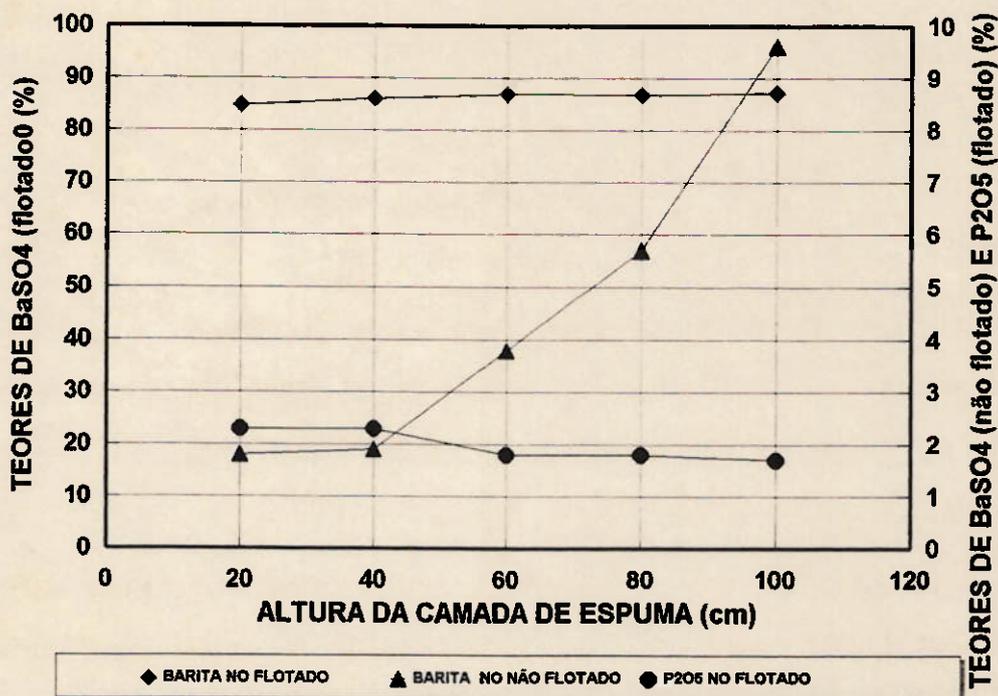
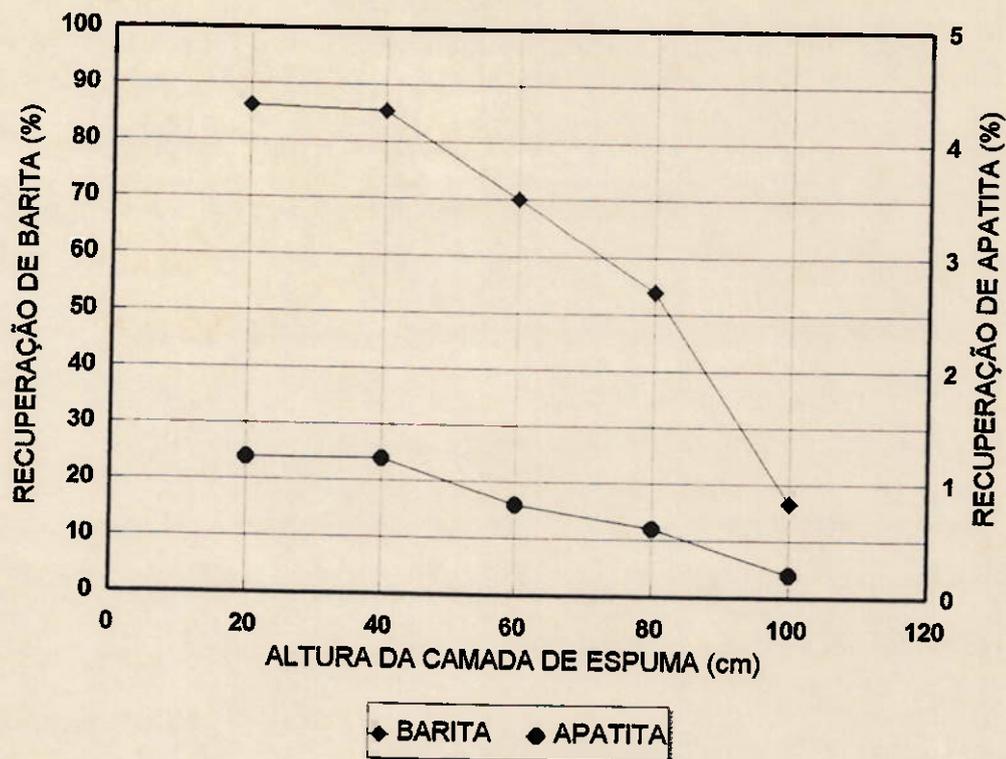


FIGURA 7.11 - INFLUÊNCIA DA ALTURA DA CAMADA DE ESPUMA NA FLOTAÇÃO DE BARITA

A diluição da polpa alimentada na coluna de flotação piloto não apresentou influência significativa nos resultados metalúrgicos. Estes ensaios foram realizados fixando-se a porcentagem de sólidos em 20 %, 30 %, 40 % e 50 %.

Devido ao fato da porcentagem de sólidos não influenciar significativamente o resultado, optou-se por trabalhar com o valor mais elevado (em torno de 49 %) para minimizar o tamanho da coluna de flotação e economizar água de processo.

A figura 7.12 mostra o efeito da porcentagem de sólidos na flotação de barita.

Os ensaios anteriores foram realizados com porcentagem de sólidos em torno de 49 %, não comprometendo portanto o desempenho da coluna.

7.2.5 Taxa de alimentação

Os ensaios para a avaliação da influência da taxa de alimentação foram realizados a partir da mudança do diâmetro do orifício de descarga da polpa do TQ1.

Estes ensaios foram realizados para as taxas de alimentação de 1,0 t/h, 2,2 t/h, 3,1 t/h e 3,8 t/h. Valores superiores a 3,8 t/h não foram possíveis de se obter devido a insuficiência de bombeamento e transbordo na alimentação da coluna.

Mesmo com altas taxas de alimentação os resultados foram satisfatórios. Devido ao fato da taxa de alimentação não influenciar significativamente o resultado, optou-se por trabalhar com o valor mais elevado (em torno de 3,8 t/h)

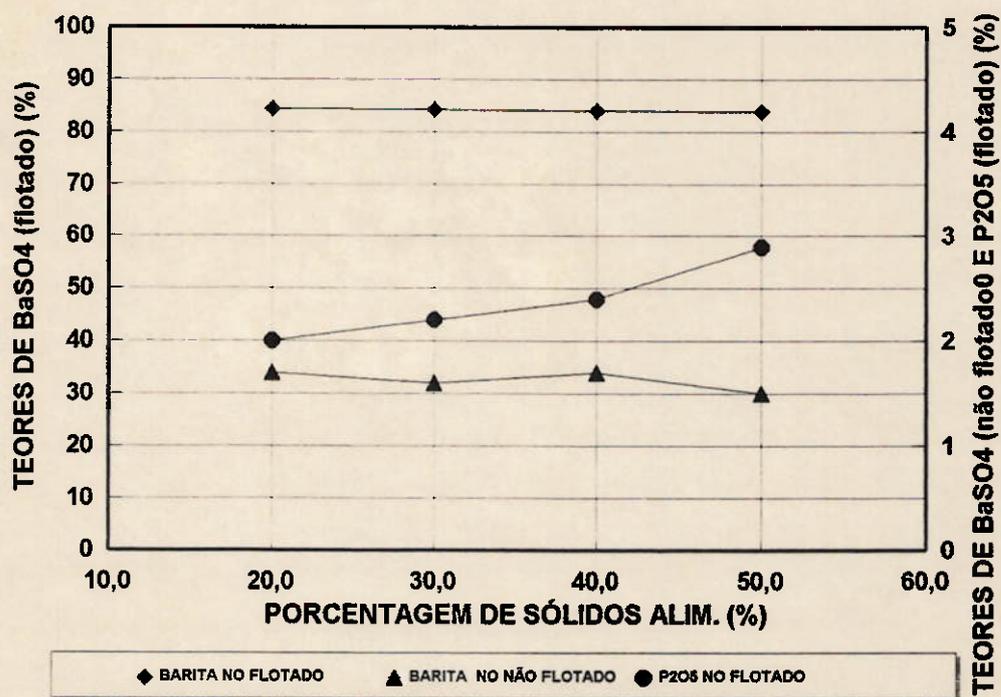
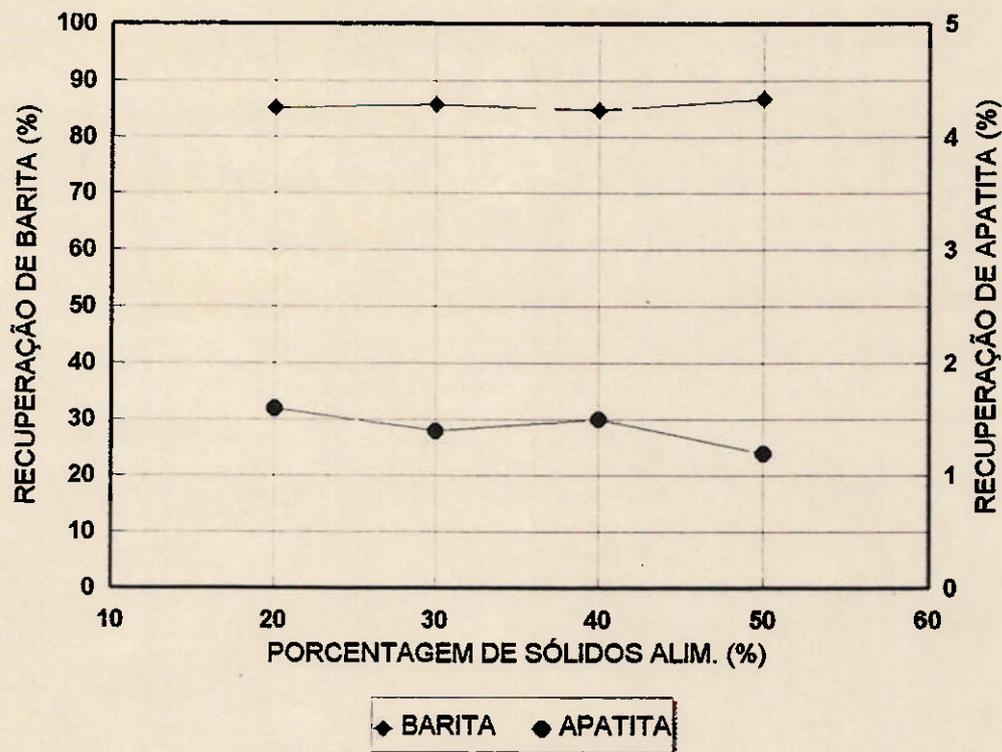


FIGURA 7.12 - INFLUÊNCIA DA PORCENTAGEM DE SÓLIDOS NA FLOTAÇÃO DE BARITA

para minimizar o tamanho da coluna de flotação.

A figura 7.13 mostra o efeito da taxa de alimentação na flotação de barita.

Os ensaios anteriores foram realizados com taxa de alimentação em torno de 3,8 t/h, não comprometendo portanto o desempenho da coluna.

7.2.6 Altura da zona de recuperação

Os ensaios para avaliação da altura da zona de recuperação foram realizados a partir da mudança da altura do aerador em relação ao topo da coluna.

Estes ensaios foram realizados variando-se a altura total da coluna (452, 694 e 936), conforme mostrado na figura 7.14.

Mesmo com baixas alturas para a zona de recuperação os resultados foram satisfatórios. Esta altura da zona de recuperação pode ser traduzida em termos de tempo de residência da polpa, sendo portanto possível flotar barita em baixos tempos. Este fato ajuda na confiabilidade dos ensaios com variação da taxa de alimentação e porcentagem de sólidos, pois nestes ensaios ocorreu variação do tempo médio de residência da polpa.

A figura 7.15 mostra o efeito da altura da zona de recuperação na flotação de barita.

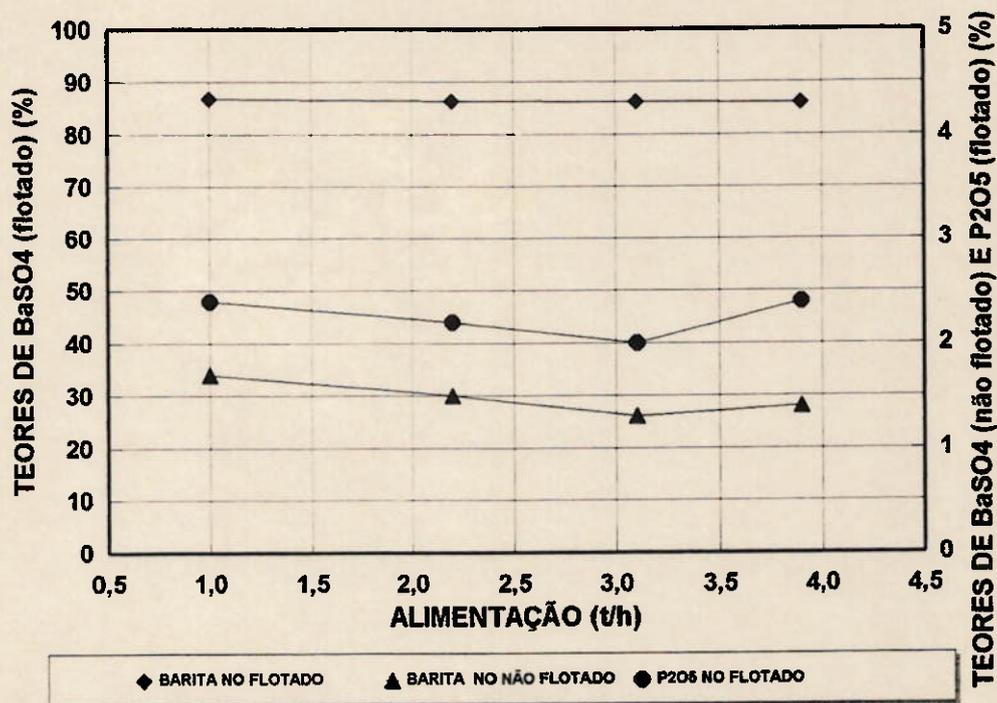
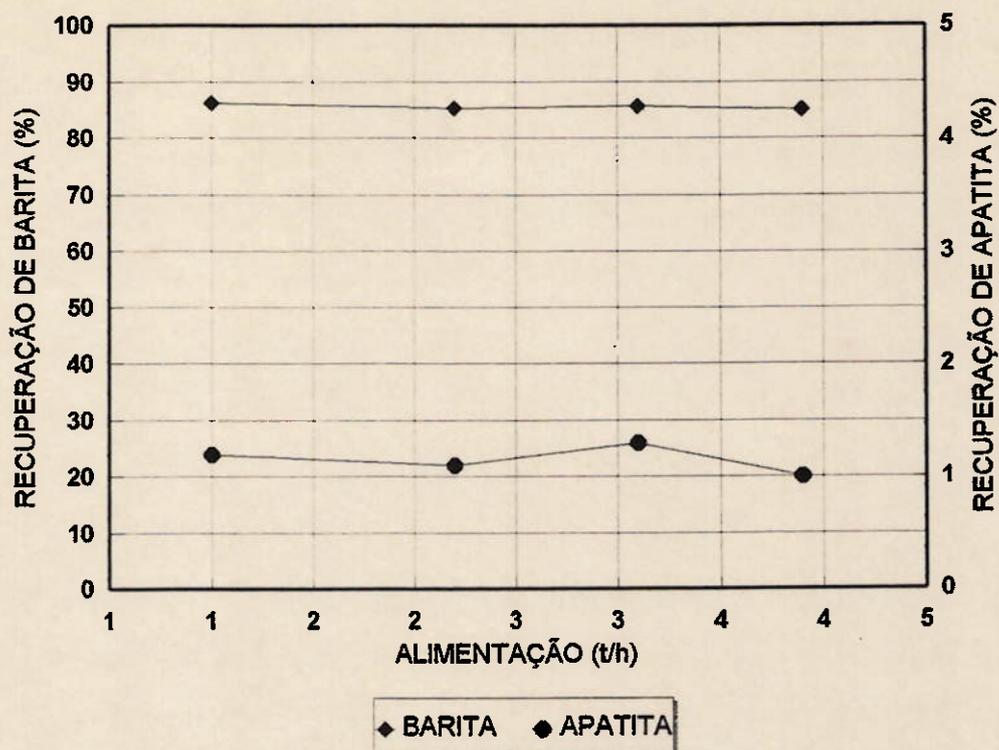
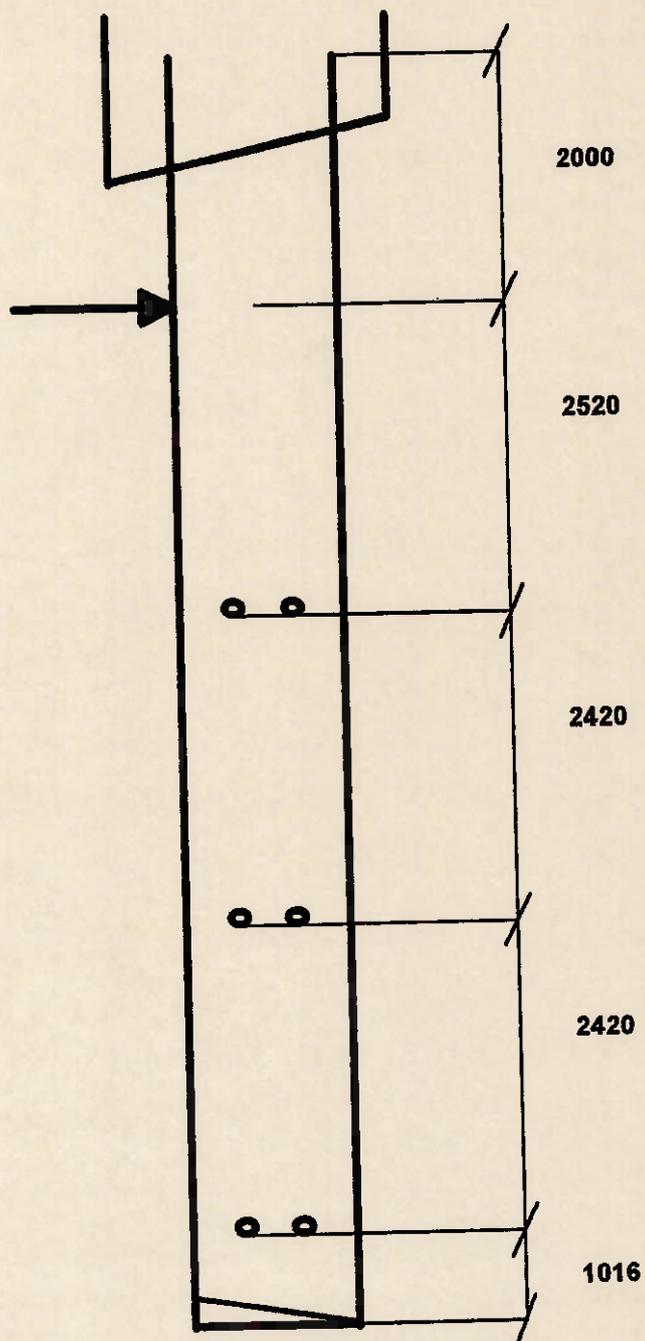


FIGURA 7.13 - INFLUÊNCIA DA TAXA DE ALIMENTAÇÃO NA FLOTAÇÃO DE BARITA



cotas em mm

FIGURA 7.14 - ESQUEMA DE VARIAÇÃO DA ALTURA DA ZONA DE RECUPERAÇÃO

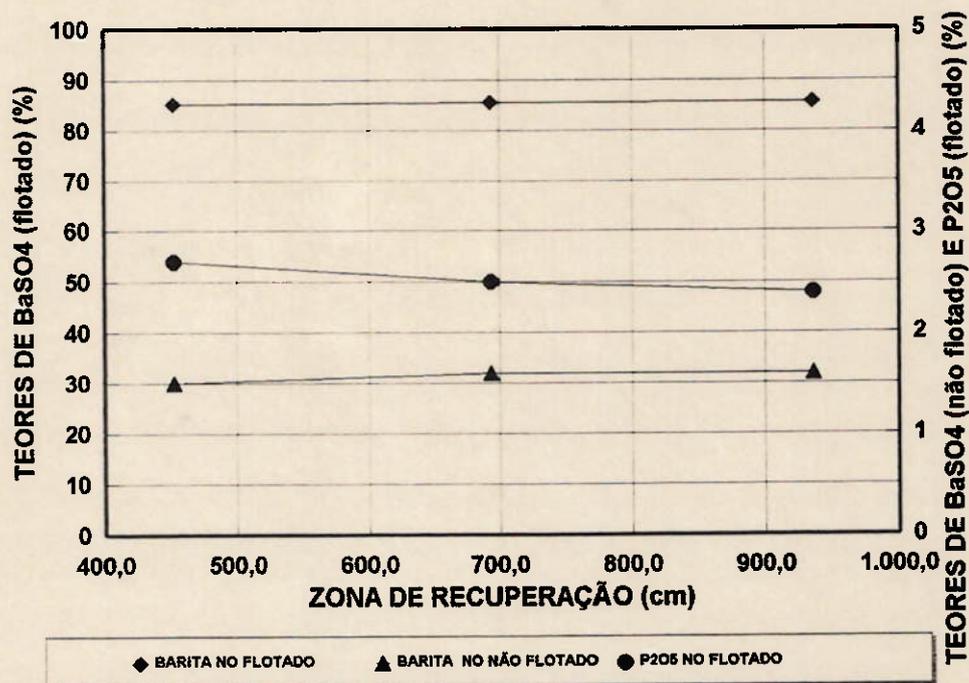
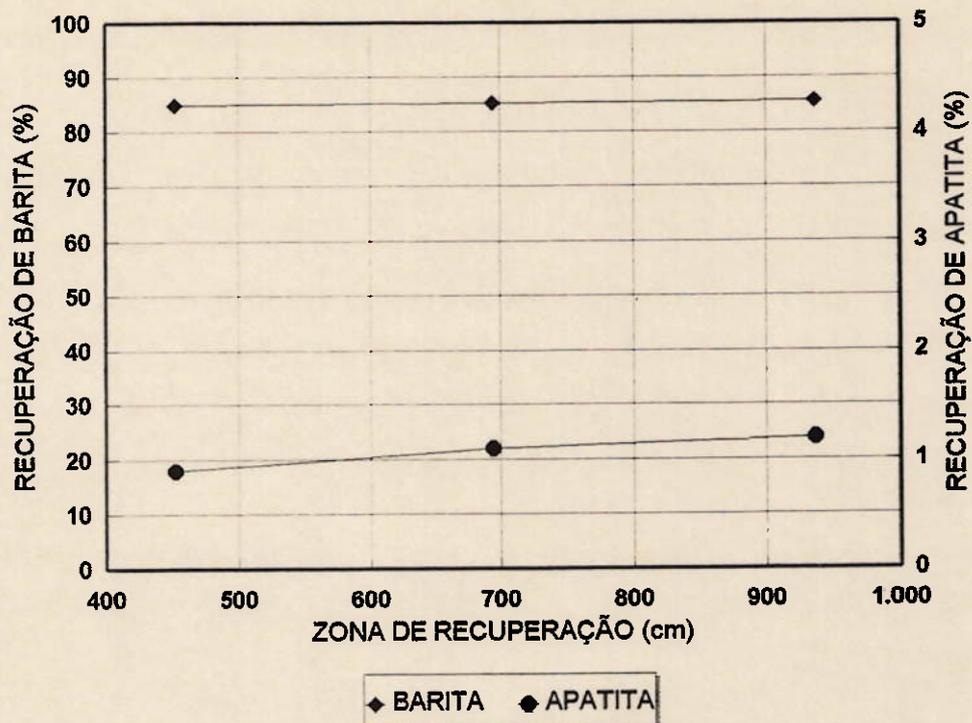


FIGURA 7.15 - INFLUÊNCIA DA ALTURA DA ZONA DE RECUPERAÇÃO NA FLOTAÇÃO DE BARITA

7.2.7 Ensaios cinéticos

Os ensaios cinéticos de flotação podem ser realizados, em escala piloto, utilizando-se as seguintes variáveis para avaliarmos o tempo de residência:

- . porcentagem de sólidos na alimentação da coluna de flotação,
- . taxa de alimentação de sólidos,
- . altura da zona de recuperação.

Foram realizados ensaios em 15 pilhas de minério variando-se as três condições acima citadas num total de 35 ensaios. Nestes ensaios a dosagem de espumante e coletor foi ajustada para obter uma recuperação de barita na faixa de 85 % e perda de apatita no máximo 2 %. As demais condições operacionais foram mantidas constantes.

Os resultados destes ensaios, bem como dos anteriores que se enquadravam nestas condições, são mostrados na figura 7.16 em termos de tempo médio de residência da polpa.

Nestes ensaios verifica-se que a barita possui uma cinética bastante favorável, sendo possível obter bons resultados com tempo médio de residência a partir de 10 minutos.

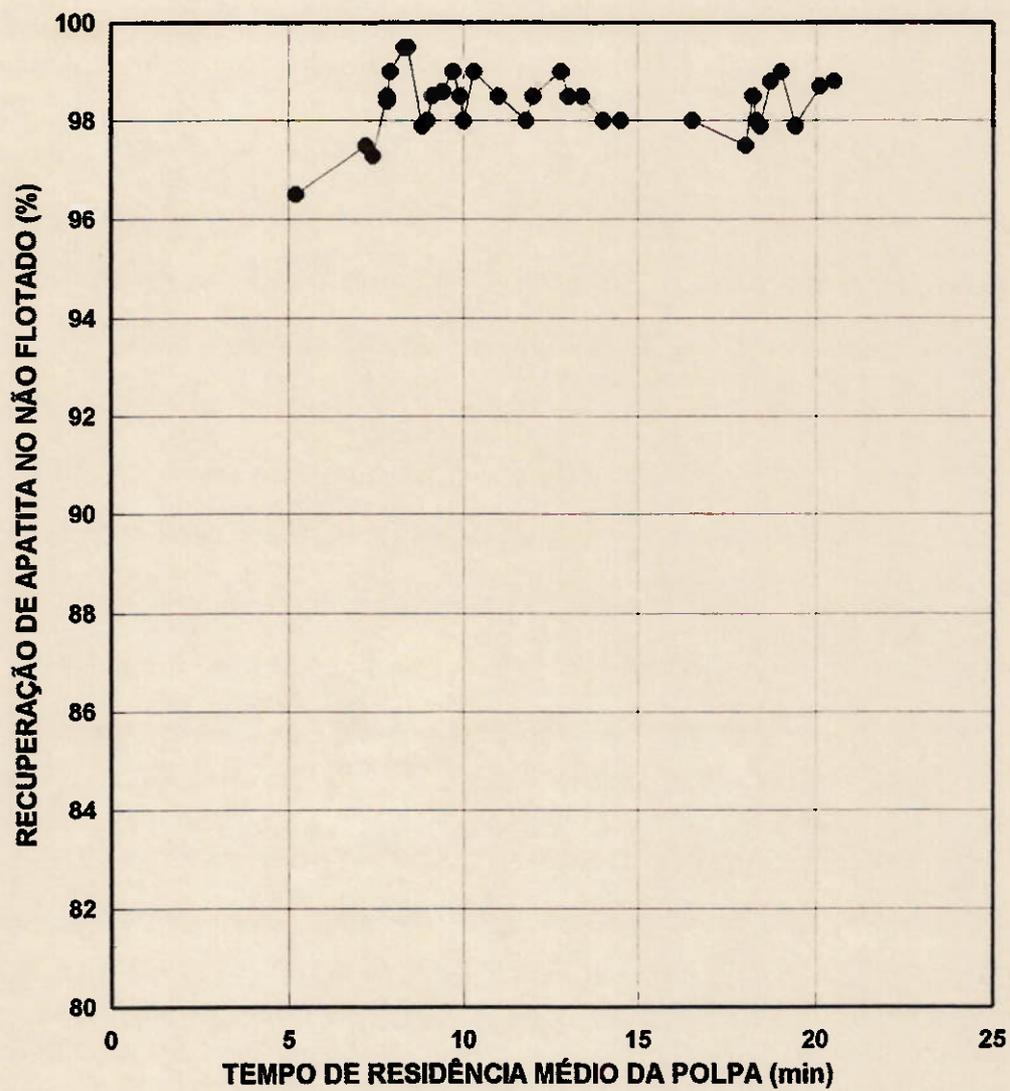


FIGURA 7.16 - ENSAIOS CINÉTICOS DE FLOTAÇÃO DE BARITA NA UNIDADE PILOTO DE FLOTAÇÃO EM COLUNA

7.3 Ensaio de longa duração em condição otimizada

O ensaio de longa duração possui o objetivo de confirmação das melhores condições de operação da instalação piloto na flotação de barita.

A partir de um ensaio realizado durante 28 horas é possível avaliarmos o desempenho da coluna de flotação em uma condição próxima da realidade: oscilações da usina industrial, acompanhamento horário de teores e recuperação e ajustes das variáveis para controle do resultado.

A tabela 7.2 mostra as condições operacionais utilizadas no ensaio. As condições utilizadas são correspondentes basicamente às que proporcionaram os melhores resultados.

A instalação piloto de flotação de barita apresentou excelente estabilidade, sendo este fato comprovado pela pequena variação dos resultados obtidos conforme mostrado na tabela 7.3.

Foi possível obter bons resultados metalúrgicos na flotação de barita em somente um estágio de flotação (circuito aberto) com as condições operacionais pré-estabelecidas nos ensaios anteriores.

Devido à boa qualidade das informações obtidas, estes resultados, bem como suas condições operacionais, serão utilizados para a calibração da instalação piloto (item 7.4) e posterior dimensionamento da coluna industrial para flotação de barita (item 7.5).

TABELA 7.2 - CONDIÇÕES OPERACIONAIS DO ENSAIO DE LONGA DURAÇÃO

ITENS	UNIDADE	VALOR
REAGENTES		
FLOTANOL D14	g/t alim.	35
FLOTINOR S72	g/t alim.	115
SODA (100 %)	g/t alim.	275
pH CONDIC.	-	9,5
ALIMENTAÇÃO	kg/h	3800
PORC. DE SÓLIDOS	%	
UD1		49,0
ALIM. DA COLUNA		49,0
FLOTADO		37,2
NÃO FLOTADO		40,6
AERADOR		
VAZÃO DE AR	Nm ³ /h	12,5
VELOCIDADE	cm/s	1,2
"Hold up"	%	16
PRESSÃO	kgf/cm ²	4,5
CHUVEIRO		
VAZÃO DE ÁGUA	l/h	2200
VELOCIDADE	cm/s	0,21
ESPUMA	cm	40
"BIAS"	cm	0,08
CAPACIDADE DE CARREAMENTO	t/h/m²	1,56
"LIP LOADING"	kg/h/m	237
TEMPO MÉDIO DE RESID. (POLPA)	min	24
VELOCIDADE SUP. DO NÃO FLOTADO	cm/s	0,62

TABELA 7.3 - BALANÇO METALÚRGICO DO ENSAIO DE LONGA DURAÇÃO

ITENS	UNIDADE	VALOR MÉDIO (%)	DESVIO PADRÃO (%)
ALIMENTAÇÃO			
	%		
BaSO ₄		10,9	0,2
P ₂ O ₅		19,2	0,3
CaO		25,0	0,3
FLOTADO			
	%		
BaSO ₄		83,7	1,0
P ₂ O ₅		2,3	0,2
CaO		2,9	0,2
NÃO FLOTADO			
	%		
BaSO ₄		1,0	0,1
P ₂ O ₅		21,5	0,4
CaO		28,0	0,3
RECUPERAÇÃO			
	%		
MASSA		11,9	0,3
BARITA		91,8	1,5
APATITA		1,4	0,2

NOTAS:

- 1 - Período do ensaio: 28 horas
- 2 - Número de amostras analisadas: 84
- 3 - Composição das amostras: 4 cortes de 15 em 15 minutos

7.4 Calibração da instalação piloto através de microcomputador

A calibração da instalação piloto de flotação para barita foi realizada a partir das condições operacionais e dos resultados obtidos no ensaio de longa duração. Foram utilizadas as equações de Yianatos, Espinoza-Gomez, Dobby e Finch, com o objetivo de gerar os parâmetros a serem usados no dimensionamento da unidade industrial de flotação de barita em coluna.

A constante cinética é calculada para cada um dos minerais, sendo portanto necessária a utilização de análise mineralógica dos produtos da flotação [105]. Foi calculada a constante cinética da barita e do agrupamento dos outros minerais sendo chamado de minerais de ganga.

O número de dispersão obtido ($N_d = 0,23$) comprova que o regime de turbulência dentro da coluna de flotação piloto foi bastante baixo, tendo a coluna se comportado como um reator tubular com baixa dispersão axial. Valores de N_d até 0,5 ainda garantem um regime mais laminar, com pouca dispersão axial, necessário a um bom desempenho da flotação em coluna.

Verifica-se uma diferença significativa entre os valores do tempo médio de residência entre o sólido e a polpa. Isto ocorre devido à sedimentação das partículas.

Os valores obtidos na calibração da unidade piloto encontram-se na tabela 7.4.

As planilhas do programa de computador para calibração da unidade piloto de flotação encontram-se no apêndice 4.

TABELA 7.4 - RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO DA COLUNA PILOTO DE FLOTAÇÃO

ITENS	UNIDADE	VALOR
VELOCIDADE DO AR	cm/s	1,2
"HOLD UP"	%	16,5
VELOCIDADE DA ÁGUA DE LAVAGEM	cm/s	0,21
"BIAS"	cm/s	0,08
Nd	-	0,23
CONSTANTE CINÉTICA BARITA	1/s	0,590
GANGA		0,005
CAPACIDADE DE CARREAMENTO	t/h/m ²	1,56
"LIP LOADING"	kg/h/m	237
TEMPO MÉDIO DE RESIDÊNCIA LÍQUIDO	min	20,6
SÓLIDO		8,5
VELOCIDADE SUP. DO NÃO FLOTADO	cm/s	0,59

7.5 Dimensionamento da coluna de flotação para barita

7.5.1 Critérios de dimensionamento

No projeto da instalação industrial de flotação de barita em coluna foram utilizadas as seguintes premissas [106]:

- . circuito em um único estágio de concentração devido aos bons resultados obtidos em escala piloto, os quais foram superiores em seletividade e recuperação com menor consumo de reagentes aos obtidos na usina industrial com células mecânicas (Wemco),
- . cálculo de condicionadores obedecendo os limites máximos obtidos em escala de bancada e confirmados em escala piloto,
- . instrumentação e controle tendo como base o sistema utilizado na unidade piloto de flotação em coluna, sendo: controle do nível pela válvula de rejeito, controle da água de chuveiro por "set-point", controle da vazão de ar por "set-point", controle da pressão do aerador pela vazão de água no misturador,
- . controle automático do pH, da porcentagem de sólidos na polpa alimentada na coluna e da dosagem de reagentes (espumante e coletor) pela medida da vazão de sólidos com atuação na velocidade da bomba de reagentes por "set-point" determinado pelo operador,
- . distribuidor de polpa externo à coluna de flotação sem interferência na obstrução de áreas e volumes da coluna,

- . coluna com seção transversal de forma retangular ou quadrada possibilitando subdivisões internas (se necessário), com boa qualidade da alimentação da polpa através de distribuição externa,
- . utilização do aerador da Cominco, que apresentou bom desempenho em escala piloto, possuindo muitas aplicações em flotação de sulfetos principalmente no Canadá,
- . chuveiro submerso na camada de espuma com o objetivo de reproduzir a filosofia utilizada na unidade piloto de flotação.

Para avaliar o dimensionamento da coluna de flotação para a barita foram utilizadas as equações propostas por Yianatos, Espinoza-Gomez, Dobby e Finch. Nesta filosofia de dimensionamento são utilizados os seguintes critérios para a determinação da geometria do equipamento:

- . utilização das equações de cálculos de reatores químicos (reator tubular com dispersão axial) como modelamento básico da coluna de flotação,
- . utilização da constante cinética dos ensaios piloto,
- . avaliação da dispersão do equipamento através do número de dispersão (Nd) para determinação da relação de altura do equipamento pela sua área superficial,
- . verificação dos parâmetros geométricos através do cálculo da capacidade de carregamento e do "lip loading",
- . realização de análise de sensibilidade do desempenho da coluna com variações na taxa de alimentação.

As equações deste modelamento estão apresentadas no item 5.5.

7.5.2 Análise de sensibilidade de variáveis via simulação

Utilizando-se os resultados de calibração da unidade piloto de flotação realizou-se o dimensionamento da instalação industrial de flotação barita conforme as etapas mostradas na figura 7.17.

Para avaliar o desempenho da coluna foi realizada uma análise de sensibilidade pela variação da taxa de alimentação, altura da coluna e número de unidades. Acompanhou-se os valores do número de dispersão, capacidade de carregamento e "lip loading".

A utilização de uma coluna de flotação de seção circular sem subdivisão de compartimentos não seria adequada para se atender ao valor do número de dispersão no máximo igual a 0,5. Esta opção seria extremamente dificultada pelos seguintes motivos:

- . altura excessiva da coluna,
- . dificuldade de "lay-out" devido ao diâmetro e à altura,
- . dificuldade de distribuição da alimentação,
- . alto valor para o "lip loading", mesmo com calhas internas para escoamento do concentrado,
- . comprometimento na eficiência de distribuição do ar na base da coluna.

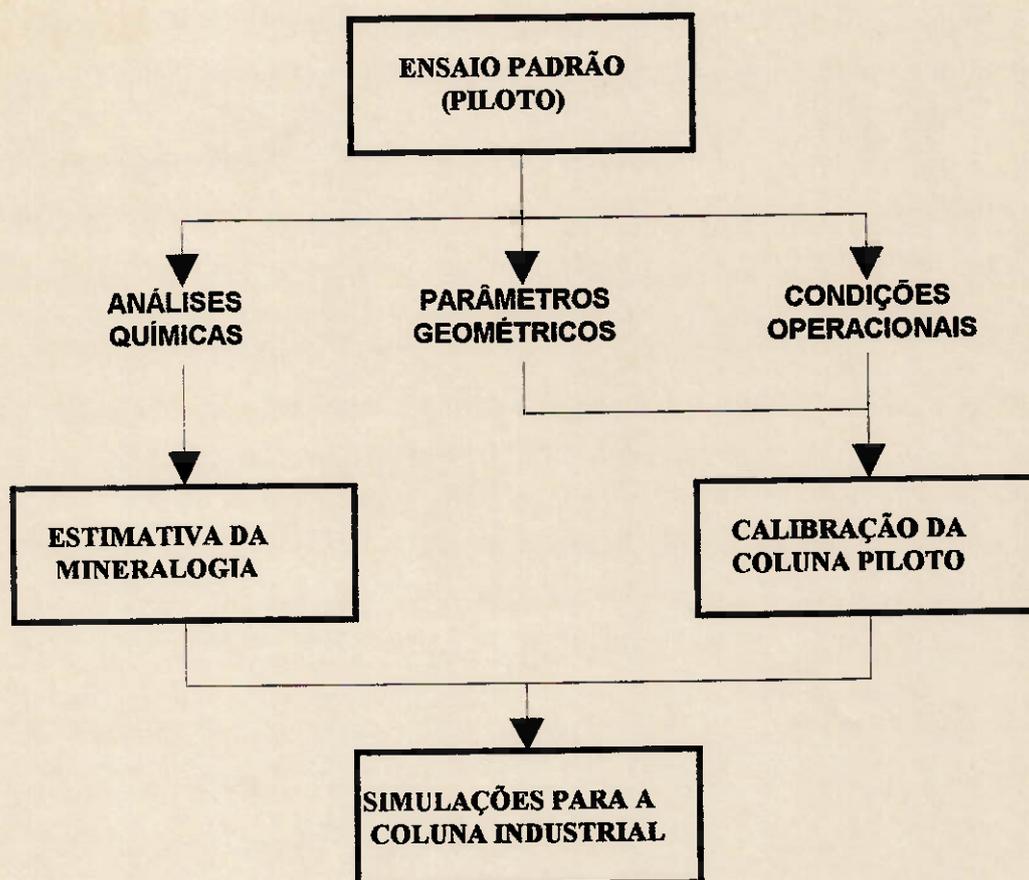


FIGURA 7.17 - ETAPAS PARA DIMENSIONAMENTO DE UMA COLUNA DE FLOTAÇÃO

Este cálculo inicial sugere a utilização de coluna de flotação com subdivisões internas. Estas subdivisões internas no equipamento proporcionam para uma mesma altura uma menor área transversal, ajustando o número de dispersão à faixa ótima de trabalho [107].

A tabela 7.5 mostra os resultados obtidos na análise com variações da taxa de alimentação e número de compartimentos.

A figura 7.18 mostra o efeito da taxa de alimentação nos parâmetros da coluna para 4 e 6 compartimentos.

Tendo-se em vista os resultados obtidos optou-se por uma coluna de 14,5 m de altura total com seção transversal de 4,5 m por 3,0 m subdividida em 6 unidades de 1,5 m por 1,5 m, conforme simulação apresentada no apêndice 5.

A figura 7.19 mostra a geometria da coluna industrial.

7.5.3 Definição final do equipamento e instalação

O circuito final de flotação de barita em coluna de flotação apresentou as seguintes características [108]:

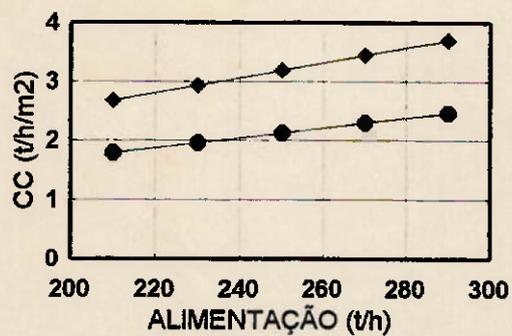
- . circuito aberto com uma coluna (4,5 m x 3,0 m x 14,5 m) subdividida em 6 compartimentos (1,5 m x 1,5 m),
- . utilização de aeradores Cominco, com 6 "spargers" (1,5 m) em cada compartimento com relação de 75 orifícios/m², conforme figura 7.20 [109],
- . chuveiro interno à camada de espuma, conforme figura 7.21,
- . instrumentação e controle detalhado na tabela 7.6.

TABELA 7.5 - SIMULAÇÕES DA FLOTAÇÃO DE BARITA POR COMPUTADOR

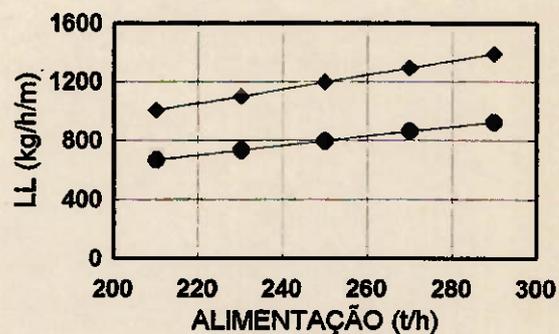
ALIM. t/h	NÚMERO UNID. ²	Nd ³	CC t/h/m ²	LL kg/h/m	TEMPO DE RESID.(min)		
					SÓLIDO	POLPA	LÍQUIDO
210	4	0,40	2,68	1006	9,9	14,6	19,7
230	4	0,39	2,94	1102	9,6	13,3	18,4
250	4	0,38	3,19	1198	9,2	12,2	17,2
270	4	0,36	3,45	1294	8,9	11,4	16,2
290	4	0,35	3,71	1390	8,6	10,6	15,1
210	6	0,45	1,79	671	11,0	21,9	24,5
230	6	0,44	1,96	735	10,8	20,0	23,7
250	6	0,43	2,13	799	10,6	18,4	22,8
270	6	0,42	2,30	862	10,6	17,0	21,8
290	6	0,42	2,47	926	10,2	15,8	20,9

NOTAS:

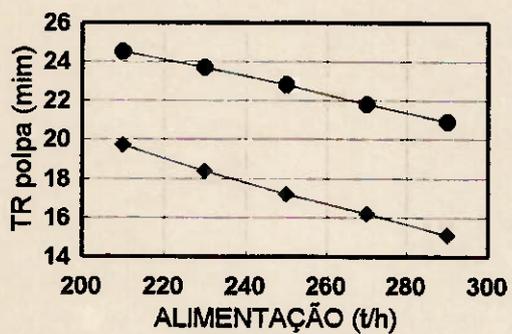
- 1 - Altura da zona de recuperação = 12 m
- 2 - Unidades = 1,5 m x 1,5 m
- 3 - Parâmetro de dispersão axial
- 4 - Capacidade de carregamento (experimental = 1,56 t/h/m²)
- 5 - "Lip loading" (experimental = 237 kg/h/m)



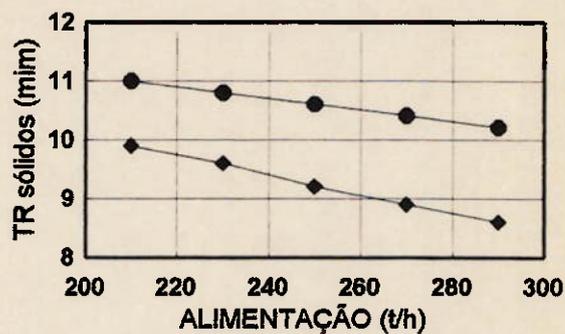
◆ 4 unidades ● 6 unidades



◆ 4 unidades ● 6 unidades



◆ 4 unidades ● 6 unidades



◆ 4 unidades ● 6 unidades

FIGURA 7.18 - EFEITO DA TAXA DE ALIMENTAÇÃO NO DESEMPENHO DA COLUNA INDUSTRIAL DE FLOTAÇÃO DE BARITA

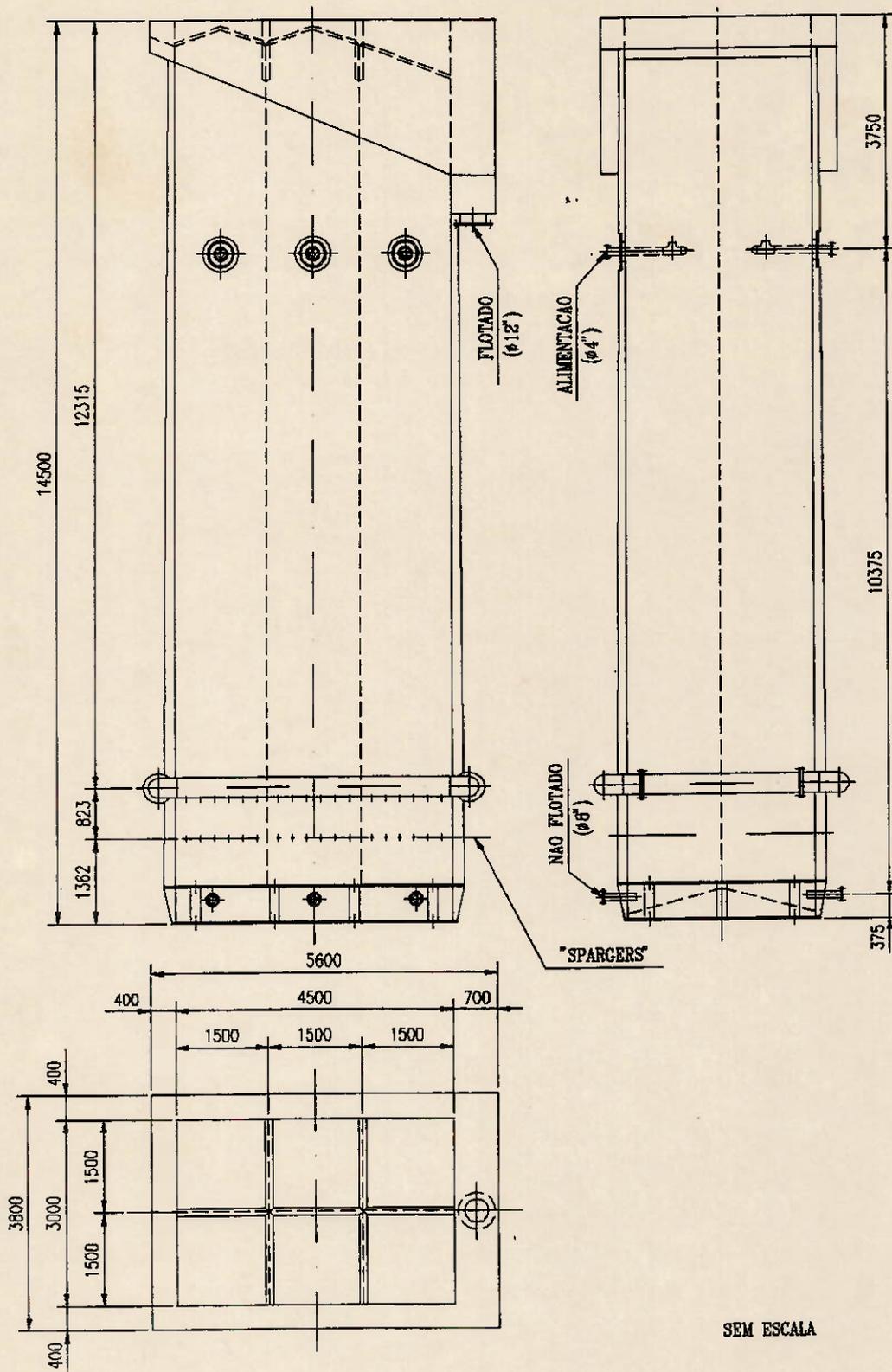


FIGURA 7.19 - GEOMETRIA DA COLUNA INDUSTRIAL DE FLOTAÇÃO DE BARITA [110]

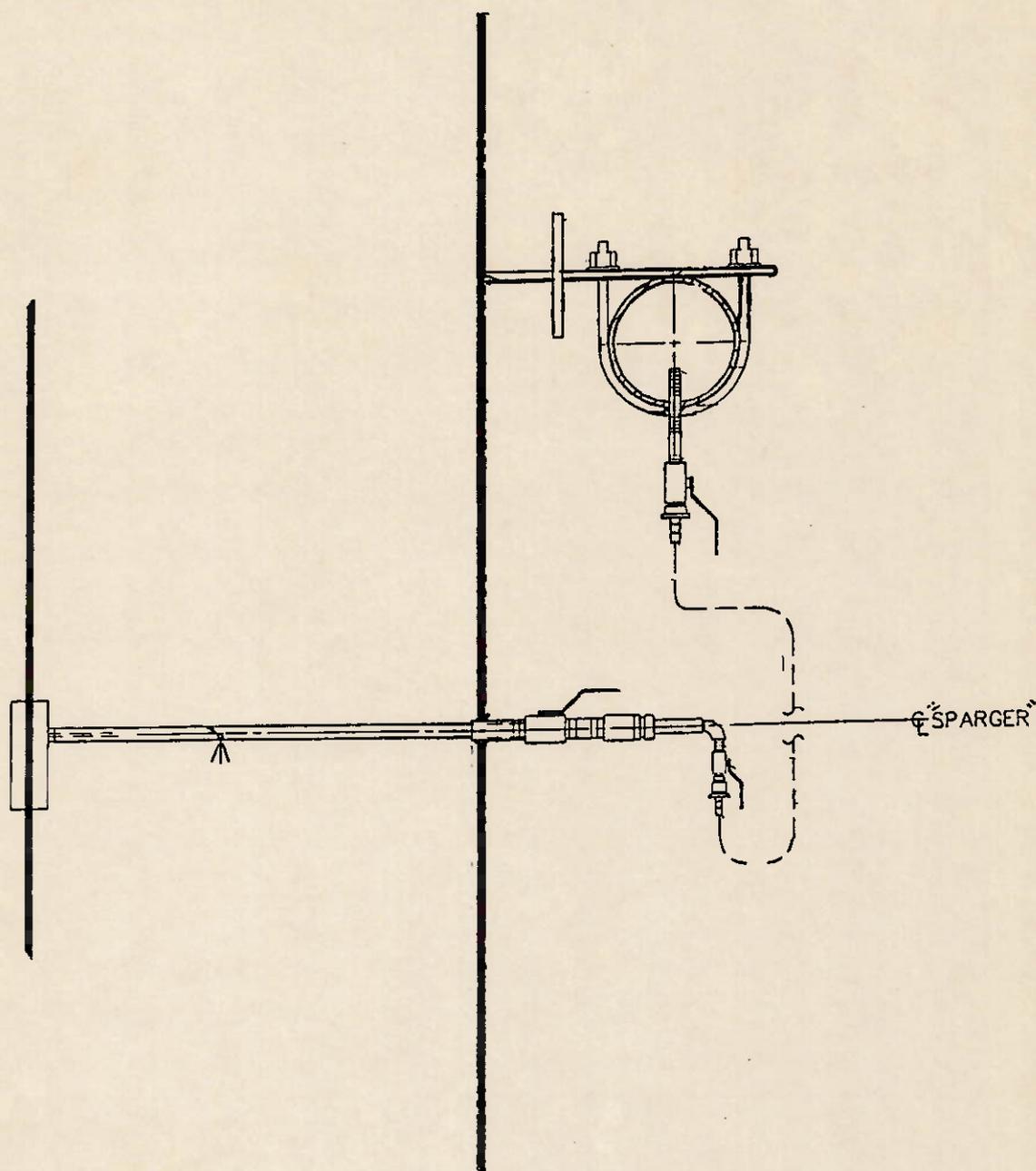


FIGURA 7.20 - SISTEMA DE AERAÇÃO DA COLUNA INDUSTRIAL DE FLOTAÇÃO DE BARITA [111], [112]

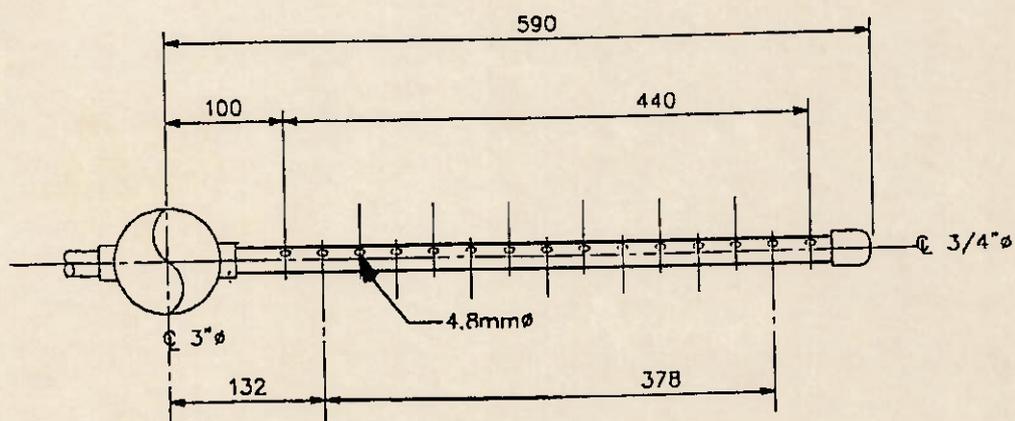
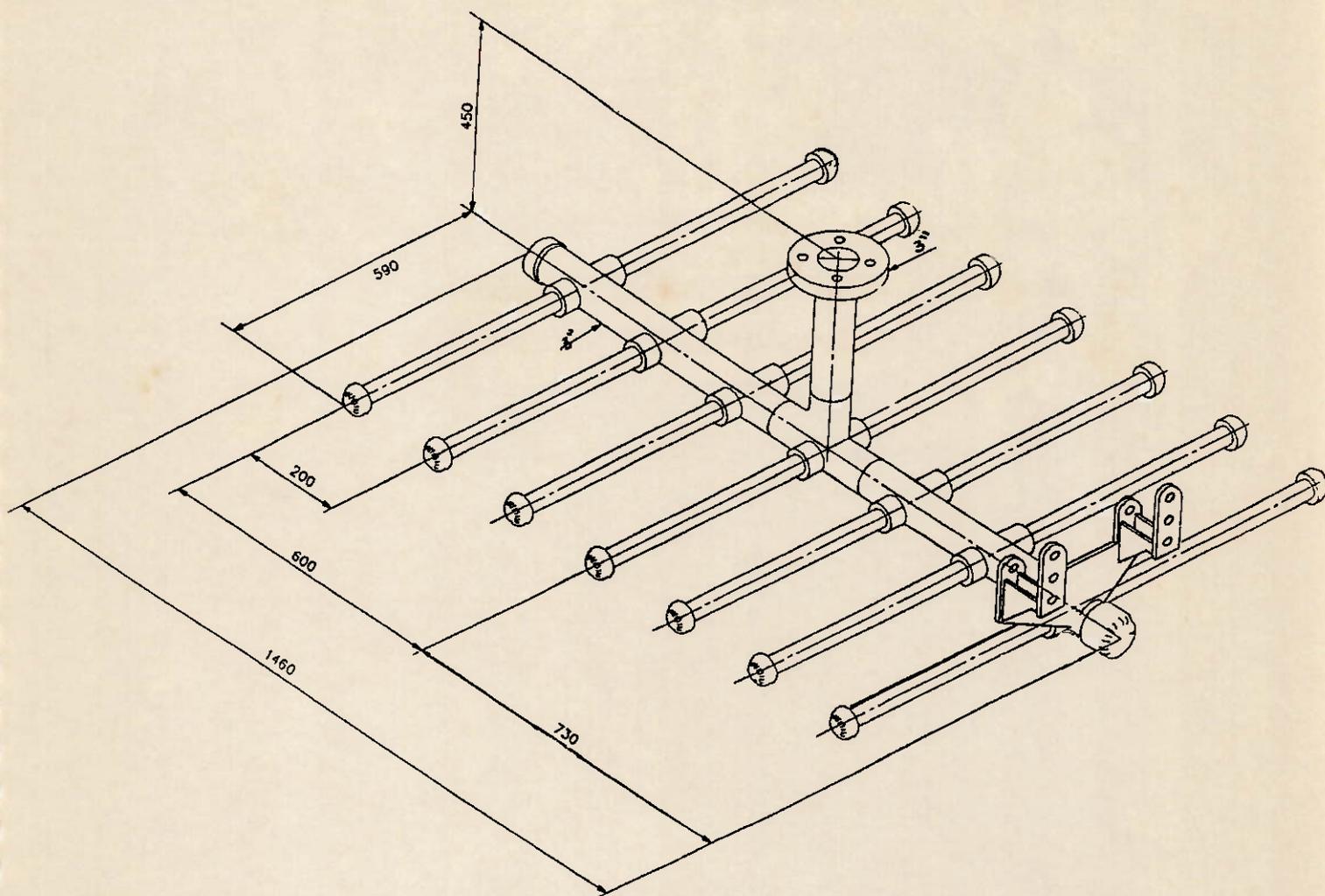


FIGURA 7.21 - SISTEMA DE LAVAGEM DA CAMADA DE ESPUMA DA COLUNA INDUSTRIAL DE FLOTAÇÃO DE BARITA

TABELA 7.6 - DETALHAMENTO DO SISTEMA DE INSTRUMENTAÇÃO E CONTROLE UTILIZADO NA UNIDADE INDUSTRIAL DE FLOTAÇÃO DE BARITA EM COLUNA

VARIÁVEL CONTROLADA	VARIÁVEL MANIPULADA	INSTRUMENTAÇÃO E CONTROLE
Camada de espuma	Vazão de Rejeito	Controle de nível por sensor pneumático atuando na válvula de rejeito
Velocidade da água de lavagem	Vazão da água água de lavagem	Placa de orifício atuando em válvula
Velocidade do ar	Vazão do ar	Placa de orifício atuando em válvula
Pressão do misturador	Vazão de água do aerador	Bomba Nemo com velocidade variável conforme pressão
Porcentagem de sólidos na alimentação	Vazão de água na alimentação	Adição de água pela medida da porcentagem de sólidos
Consumo de reagentes	Dosagem de reagentes	Medida da massa alimentada atuando em bomba de deslocamento positivo com velocidade variável
pH	Vazão de soda	pHmetro atuando em válvula

O fluxograma final da instalação (figura 7.22) foi portanto obtido com as informações dos ensaios piloto de flotação bem como a partir das simulações realizadas.

7.6 Avaliação econômica do projeto

A análise econômica do projeto de coluna de flotação para a flotação de barita teve como padrão os custos de insumos e produção realizados no ano de 1993.

A análise econômica foi dividida nos seguintes tópicos:

- . valor do investimento,
- . redução de gastos,
- . análise de sensibilidade.

VALOR DO INVESTIMENTO

O valor orçado para o investimento referente ao projeto de flotação em coluna para a barita foi de US\$ 500.000,00 enquanto que o realizado foi US\$ 359.000,00, com redução de US 141.000,00. Neste investimento estão incluídos projeto, fabricação da coluna e seus periféricos, compra de materiais e equipamentos, instrumentação, obras civis, montagens gerais e outros gastos. A tabela 7.7 mostra os principais itens do investimento fazendo uma comparação dos valores orçados com os realizados [113], [114].

Analisando-se o orçamento verifica-se que as principais reduções ocorreram em materiais e equipamentos (US\$ 64.000,00) e no item outros (US\$ 72.500,00) responsáveis por 45 % e 51 % da redução do investimento respectivamente.

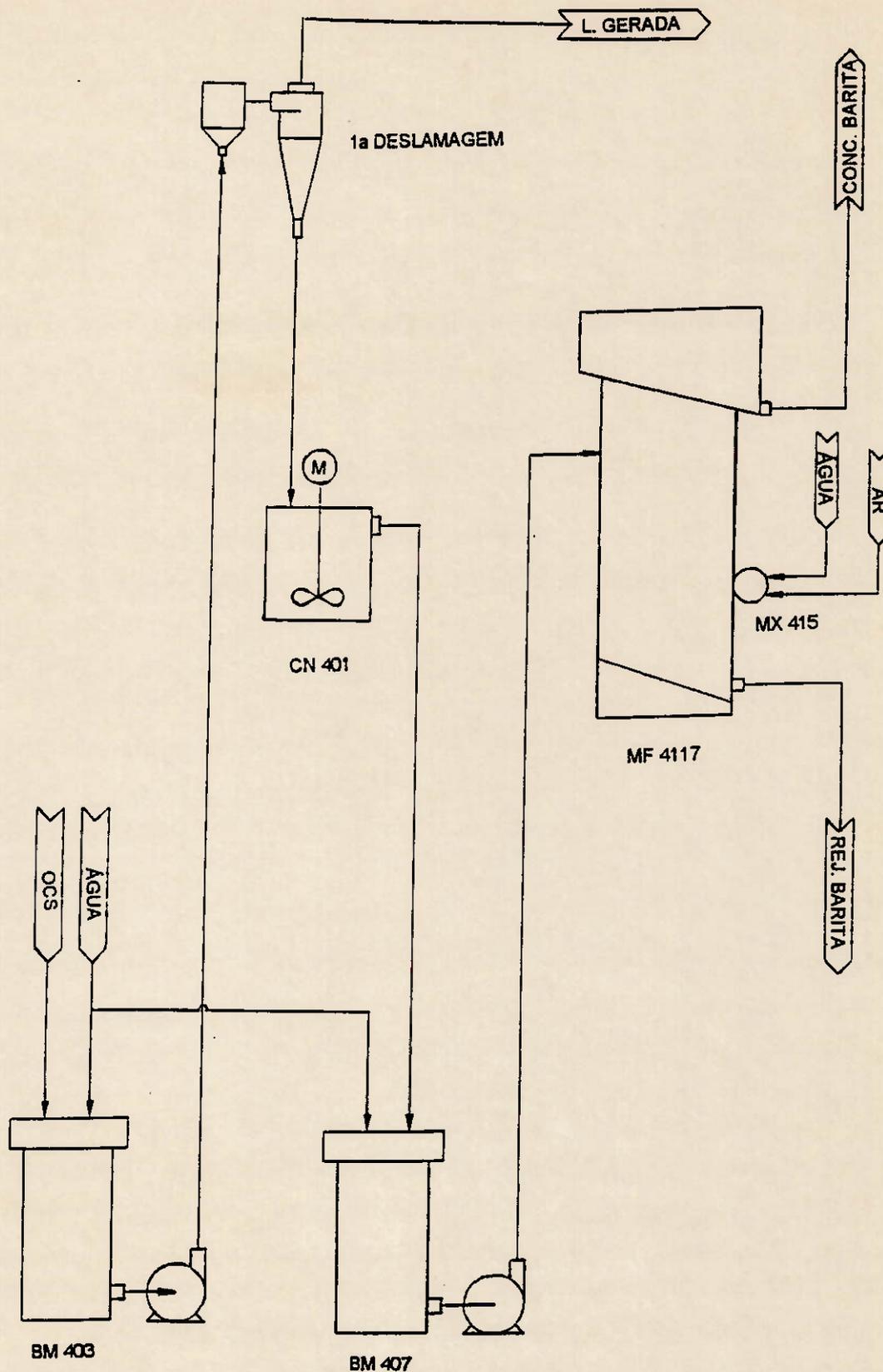


FIGURA 7.22 - FLUXOGRAMA DA UNIDADE INDUSTRIAL DE FLOTAÇÃO DE BARITA EM COLUNA [110]

TABELA 7.7 - COMPARAÇÃO ENTRE O INVESTIMENTO ORÇADO E REALIZADO

ITENS	ORÇADO		REALIZADO	
	(US\$)	(%)	(US\$)	(%)
PROJETO	25.000,00	5,00	20.000,00	5,57
OBRAS CIVIS	36.250,00	7,25	25.500,00	7,10
MATERIAIS E EQUIPAMENTOS	295.500,00	59,10	231.500,00	64,48
INSTRUMENTAÇÃO	34.750,00	6,95	35.750,00	9,96
MÃO-DE-OBRA DE MONTAGEM	19.750,00	3,95	30.000,00	8,36
OUTROS	88.750,00	17,75	16.250,00	4,53
TOTAL	500.000,00	100,00	359.000,00	100,00

O preço da coluna, incluindo os "spargers" do aerador, foi de US\$ 124000,00 correspondendo a 35 % do investimento total.

REDUÇÃO DE GASTOS E RECEITA ADICIONAL

Neste item foram consideradas 7300 horas de operação da usina durante o ano. Os valores orçados foram obtidos a partir dos preços dos reagentes tendo como base o ano de 1993 e a expectativa de desempenho da coluna de flotação pela realização dos ensaios piloto. Os valores reais foram obtidos a partir da operação da unidade industrial de maio de 1994 a maio de 1995 considerando como base 7300 horas de operação para melhor comparação dos resultados.

A redução de gastos e receita adicional foi dividida nos seguintes itens:

- . redução de gastos variáveis (energia elétrica, espumante e coletor),
- . aumento de recuperação de apatita.

A redução de energia corresponde à não utilização dos motores dos rotores das células mecânicas (150 Hp). Apesar da necessidade de utilização de compressor para a geração de ar houve uma redução de 76 Hp, correspondendo a 49,5 % de redução da energia elétrica da flotação de barita. Devido ao fato da unidade de barita já apresentar originalmente baixo consumo de energia, este valor corresponde á diminuição de 0,5 % da energia de toda a usina de beneficiamento.

O valor orçado para a redução de custo referente à diminuição do consumo de energia elétrica foi de US\$ 8.245,00/ano. O valor realizado foi de US\$ 10.347,00/ano devido do aumento do custo de energia de 0,0200 US\$/kwh para 0,0251 US\$/kwh.

O consumo de espumante e coletor é bastante variável com a qualidade do minério e a necessidade de produção de concentrado de apatita de melhor qualidade. Devido a este fato a verificação da real diminuição do consumo destes reagentes foi feita a partir da comparação dos resultados de flotação da unidade piloto com os obtidos na unidade industrial com coluna de flotação numa mesma pilha de minério. Verificou-se que o consumo de reagentes na unidade piloto foi igual ao da industrial para uma mesma qualidade de produto. Os resultados de diminuição de consumo de espumante e de coletor na unidade piloto (20 % e 25 % respectivamente), comparativamente à unidade industrial de flotação em célula mecânica, foram desta maneira comprovados.

Os valores orçados para a redução de custo referentes à diminuição do consumo de espumante e reagente foram de US\$ 32.400,00/ano e US\$ 51.704,00/ano respectivamente. Os valores realizados foram de US\$ 28.035,00/ano e US\$ 77.444,00 devido à diminuição do custo de espumante de 2.160 US\$/t para 1.859 US\$/t e ao aumento do preço do coletor de 920 US\$/t para 1.378 US\$/t.

A receita adicional na flotação vem da diminuição da perda de apatita no concentrado de barita. Na flotação em célula mecânica a perda de apatita era da ordem de 4 a 5 %

enquanto na flotação em coluna a expectativa de redução de perda para 1,5 a 2,0 % foi confirmada experimentalmente. Esta redução proporciona uma produção excedente em torno de 1,5 t/h de concentrado apatítico, ou seja 10.950 t/ano. Este excedente de produção pode gerar receita adicional pela sua venda, reduzir o número de horas trabalhadas na usina diminuindo os gastos variáveis ou mesmo reduzir os gastos fixos pelo aumento da produção horária de concentrado apatítico.

Analisando-se de forma conservadora tem-se um orçamento de aumento de receita ou diminuição de gastos fixos em torno de US\$ 357.700,00/ano. Contudo o valor realizado foi de US\$ 255.500,00/ano devido ao aumento real do custo de produção devido a fatores econômico de custo de insumos e lavra de minério, bem como a diminuição do preço de venda dos concentrados apatíticos.

A tabela 7.8 mostra a redução de custos com a flotação de barita em coluna de flotação. A expectativa de redução anual de US\$ 450.049,00 não foi alcançada, sendo atingido o valor anual de US\$ 371.376,00. Esta diminuição de 17,5 % das receitas e diminuição de custos não foi devido ao desempenho da coluna de flotação já que tecnicamente todas as expectativas foram atingidas (tabela 7.9). As causas desta diferença foram o aumento dos custos de insumos e a diminuição do preço de venda já citados.

ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Para a realização da análise de sensibilidade foram adotadas as seguintes premissas econômicas:

TABELA 7.8 - REDUÇÃO DE CUSTOS COM A FLOTAÇÃO DE BARITA EM COLUNA

ITENS	ORÇADO		REALIZADO	
	(US\$/ano)	(%)	(US\$/ano)	(%)
ENERGIA	8.245,00	1,83	10.347,00	2,79
ESPUMANTE	32.400,00	7,20	28.035,00	7,55
COLETOR	51.704,00	11,49	77.444,00	20,85
AUMENTO DE REC. DE APATITA	357.700,00	79,48	255.550,00	68,81
TOTAL	450.049,00	100,00	371.376,00	100,00

**TABELA 7.9 - COMPARAÇÃO DO DESEMPENHO DA FLOTAÇÃO EM COLUNA
ENTRE A UNIDADE PILOTO E A INDUSTRIAL**

ITENS	UNIDADE	INSTALAÇÃO PILOTO	INSTALAÇÃO INDUSTRIAL
REAGENTES	g/t alim.		
espumante		30 - 40	30 - 40
coletor		100 - 130	100 - 130
soda (100 %)		150 - 200	140 - 220
BALANÇO METALÚRGICO	%		
Rec. Barita		9 - 11	9 - 11
Rec. Apatita		1,5 - 2,3	1,5 - 2,5

- . fluxo de caixa anual,
- . taxas de 45 %,
- . depreciação linear em 10 anos.

O orçamento inicial do projeto previa uma taxa interna de retorno de 46 % no quinto ano com 1,9 anos para o tempo de pagamento do investimento após as taxas conforme mostrado na tabela 7.10 [115], [116].

A partir desta base de dados realizaram-se as seguintes análises de sensibilidade:

- . variação do valor do investimento (US\$ 200.000,00 a US\$ 700.000,00) com resultado econômico do orçamento (US\$ 450.049,00),
- . variação do resultado econômico (50 % inferior a 50 % superior) com valor do investimento do orçamento (US\$ 500.000,00).

A variação do investimento mostrou que mesmo com valores altos a taxa interna de retorno ainda era atrativa (30 % a 40 % ao ano), com tempo de pagamento do investimento não superior a 2 anos, conforme mostrado na figura 7.23.

A variação do resultado econômico de 50 % inferior ao orçado até 50 % superior ao orçado, mostrou que mesmo com alta redução do resultado econômico a taxa interna de retorno ainda era atrativa (20 % a 40% ao ano) com tempo de pagamento do investimento não superior a 3 anos, conforme mostrado na figura 7.24.

TABELA 7.10 - FLUXO DE CAIXA ORÇADO PARA O PROJETO DE FLOTAÇÃO DE BARITA EM COLUNA [117]

ITENS	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1 - RECEITAS	-	450049	450049	450049	450049	450049	450049	450049	450049	450049	450049
2 - DEPRECIACAO	-	-50000	-50000	-50000	-50000	-50000	-50000	-50000	-50000	-50000	-50000
3 - FLUXO DE CAIXA ANTES TX	-	400049	400049	400049	400049	400049	400049	400049	400049	400049	400049
4 - IMPOSTOS	-	180022	180022	180022	180022	180022	180022	180022	180022	180022	180022
5 - FLUXO DE CAIXA APOS TX	-	220027	220027	220027	220027	220027	220027	220027	220027	220027	220027
6 - DEPRECIACAO	-	50000	50000	50000	50000	50000	50000	50000	50000	50000	50000
7 - INVESTIMENTO	-500000										
8 - DISPONIB. SIMPLES ACUM.	-500000	270027	270027	270027	270027	270027	270027	270027	270027	270027	270027
	-500000	-229973	40053,9	310081	580108	850135	1120162	1390189	1660216	1930243	2200270
10 - TIR	-	-	5%	29%	40%	46%	49%	51%	52%	53%	53%

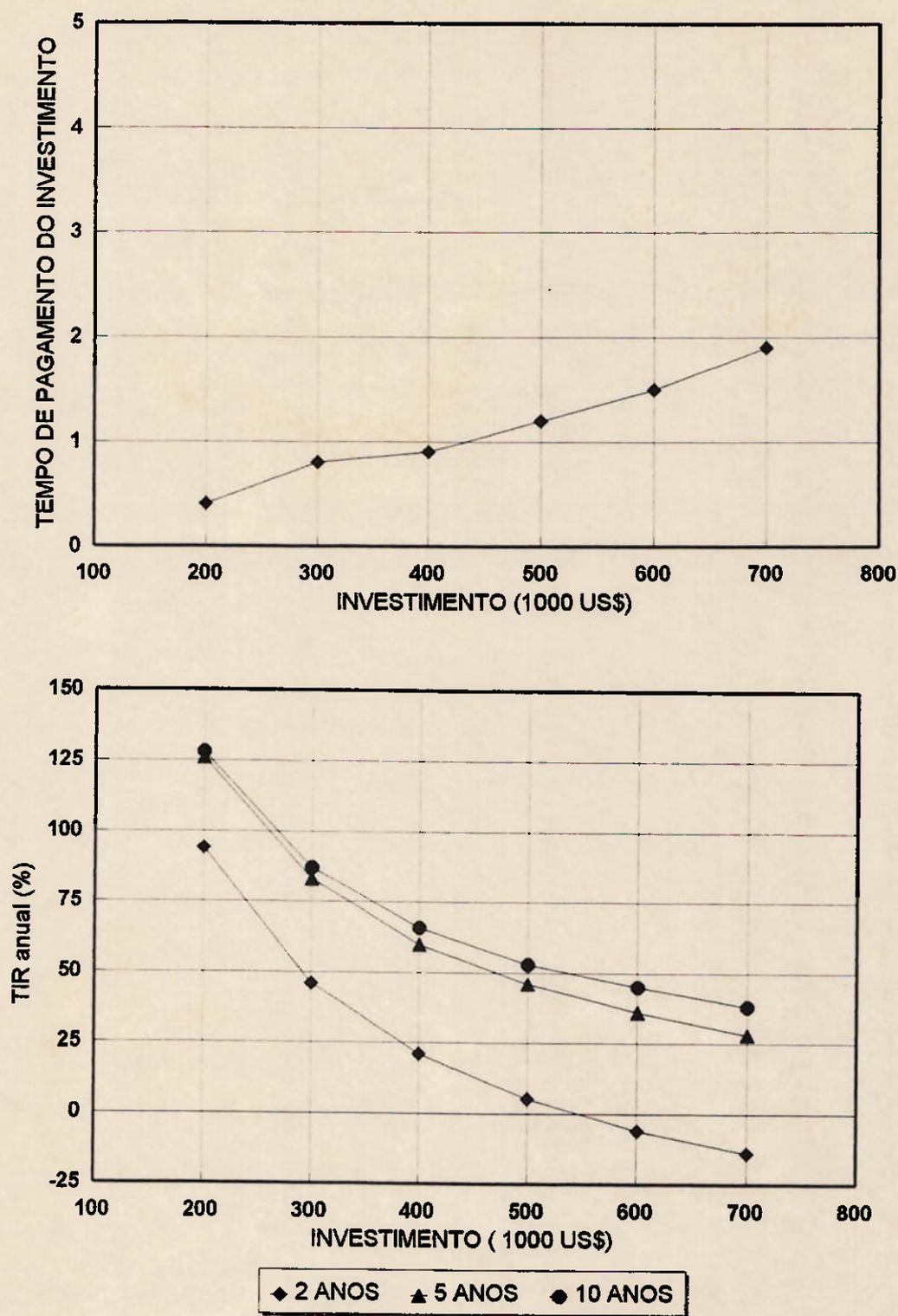


FIGURA 7.23 - INFLUÊNCIA DO VALOR DO INVESTIMENTO NA TAXA INTERNA DE RETORNO E NO TEMPO DE PAGAMENTO DO INVESTIMENTO ORÇADO

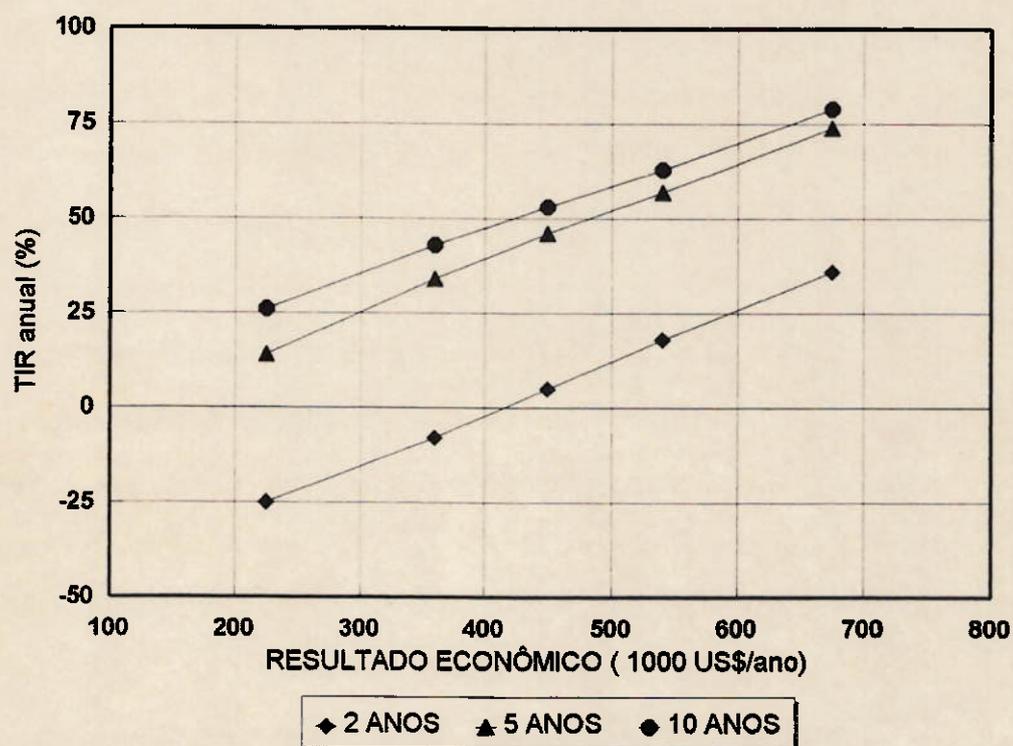
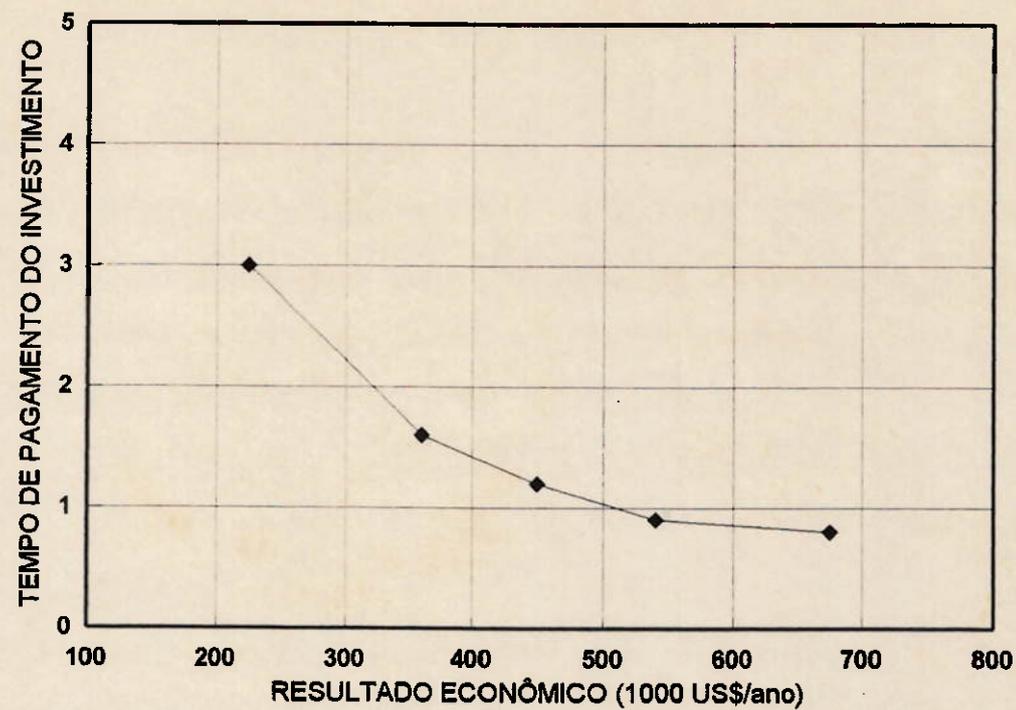


FIGURA 7.24 - INFLUÊNCIA DO RESULTADO ECONÔMICO NA TAXA INTERNA DE RETORNO E NO TEMPO DE PAGAMENTO DO INVESTIMENTO ORÇADO

Fazendo uma combinação de alto investimento (US\$ 700000,00) com resultado econômico de US\$ 225025,00 (50 % inferior ao orçado) obteve-se uma taxa interna de retorno de 18 % ao ano, com tempo de pagamento do investimento em torno de 4 anos.

Como o investimento apresentou atratividade econômica mesmo com condições totalmente adversas o projeto foi considerado economicamente viável.

Todos estes dados referem-se ao resultado após a aplicação das taxas e sem consideração de financiamento, que alavancaria bastante o estudo econômico.

Após praticamente 1,5 anos de funcionamento é possível reavaliar o estudo econômico do projeto já implantado com investimento inferior ao orçado (US\$ 359000,00) e resultado econômico inferior (US\$ 371776,00).

Apesar da diminuição do resultado econômico, a diminuição do investimento proporcionou uma taxa interna de retorno de 50 % a 60 % ao ano com tempo de pagamento do investimento após as taxas em torno de 1 ano, conforme mostrado na tabela 7.11.

A análise de sensibilidade pela variação do resultado econômico é mostrado na figura 7.25.

Considerando a situação atual e suas sensibilidades pode-se dizer que o projeto apresenta rentabilidade econômica dentro do esperado:

TABELA 7.11 - PROJEÇÃO DO FLUXO DE CAIXA PARA O PROJETO DE FLOTAÇÃO DE BARITA EM COLUNA

ITENS	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1 - RECEITAS	-	371376	371376	371376	371376	371376	371376	371376	371376	371376	371376
2 - DEPRECIACAO	-	-35900	-35900	-35900	-35900	-35900	-35900	-35900	-35900	-35900	-35900
3 - FLUXO DE CAIXA ANTES TX	-	335476	335476	335476	335476	335476	335476	335476	335476	335476	335476
4 - IMPOSTOS	-	150964	150964	150964	150964	150964	150964	150964	150964	150964	150964
5 - FLUXO DE CAIXA APOS TX	-	184512	184512	184512	184512	184512	184512	184512	184512	184512	184512
6 - DEPRECIACAO	-	35900	35900	35900	35900	35900	35900	35900	35900	35900	35900
7 - INVESTIMENTO	-359000										
8 - DISPONIB. SIMPLES ACUM.	-359000	220412	220412	220412	220412	220412	220412	220412	220412	220412	220412
	-359000	-138588	81823,6	302235	522647	743059	963471	1183883	1404294	1624706	1845118
10 - TIR	-	-	15%	38%	49%	54%	57%	59%	60%	61%	61%

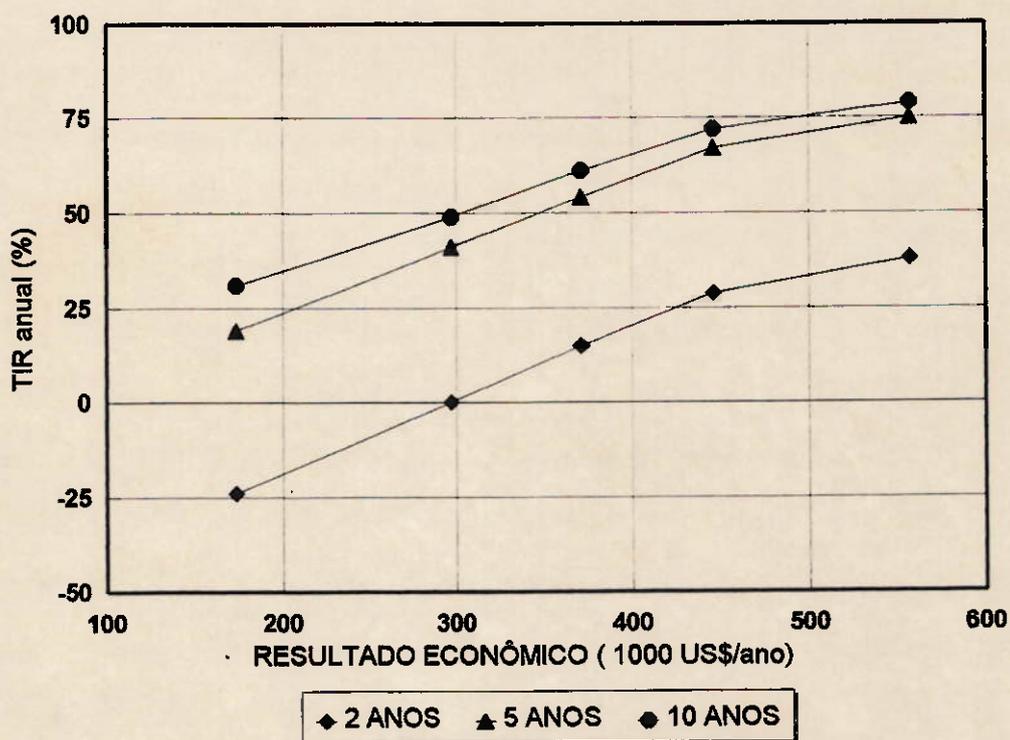
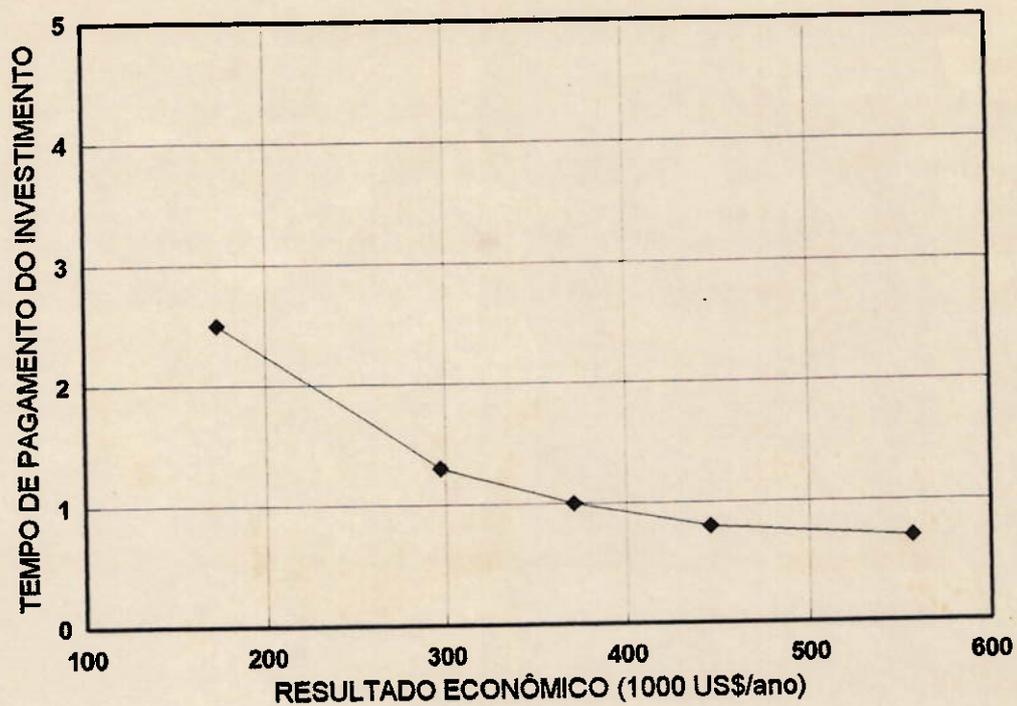


FIGURA 7.25 - INFLUÊNCIA DO RESULTADO ECONÔMICO NA TAXA INTERNA DE RETORNO E NO TEMPO DE PAGAMENTO DO INVESTIMENTO REALIZADO

- . taxa interna de retorno: orçada : 46 % ao ano (5^o ano)
realizada: 54 % ao ano (5^o ano)
- . tempo de pagamento do investimento: orçado : 1,9 anos
realizado: 1,0 anos

7.7 Instalação e pré-operação da unidade industrial

A montagem da unidade industrial de flotação de barita em coluna iniciou-se em outubro de 1993. Nesta época a usina de beneficiamento da Arafertil estava operando em regime ininterrupto, somente com paradas programadas mensais de 12 horas. As obras civis, bem como a montagem da coluna de flotação ocorreram paralelamente à operação da usina, sem a necessidade de paradas.

No período de dezembro de 1993 a janeiro de 1994, durante a parada anual de manutenção, fez-se a interligação das tubulações, instrumentação e montagem da parte elétrica.

A unidade industrial teve início de operação na última semana do mês de janeiro de 1994.

Como é comum em instalações industriais de grande porte, alguns ajustes fizeram-se necessários [118]:

- . ajuste da instrumentação e ponto de medição do pH de condicionamento da polpa,
- . aumento da rotação da bomba que alimenta a flotação, tendo-se em vista que no início da operação esta apresentou transbordo de polpa,

- . tentativa de adição de espumante na alimentação da coluna, no distribuidor de polpa, com o objetivo de diminuir o tempo de condicionamento; retornando em seguida para o condicionador de espumante e coletor,
- . adequação da instrumentação de controle da porcentagem de sólidos da alimentação da coluna através da calibração do instrumento,
- . substituição da tubulação de rejeito (6 saídas), que no projeto inicial foi prevista com diâmetro de 4" (10,2 cm), por tubulações de 8" (20,3 cm), devido a constantes entupimentos,
- . substituição da tubulação geral do rejeito que no projeto inicial foi prevista com diâmetro de 8" (20,3 cm), por tubulações de 10" (25,4 cm), devido a constantes entupimentos,
- . medida das vazões de água de cada um dos "spargers" do aerador, com objetivo de verificar se as vazões não se diferenciavam mais que 10 % (valor admitido pelo fabricante do aerador),
- . ajustes no nivelamento do misturador para garantir a equalização das vazões dos "spargers",
- . ajustes no controlador de nível para melhor controle da camada de espuma, que apresentava valores bastante distintos (20 a 100 cm) em cada compartimento, comprometendo o resultado da flotação em termos de recuperação de barita; providência que não solucionou o problema,
- . foram feitos 5 orifícios de diâmetro de 4" ao longo das paredes internas da coluna de flotação com o objetivo de

equalização das pressões, possibilitando o controle da camada de espuma com bastante precisão através de válvula única, solucionando o problema sem causar dispersão axial significativa entre os compartimentos.

No início da operação o principal problema encontrado foi o de aterramento dos compartimentos das colunas, que foi solucionado através da substituição das tubulações de rejeito por outras de maior diâmetro, possibilitando a operação da coluna mesmo sem estar com todas as suas condições ajustadas.

No quarto dia de operação já estava produzindo concentrado de barita e de apatita (GCA) dentro das especificações, contudo sendo necessários os ajustes acima citados.

Após aproximadamente dois meses de operação da instalação, a coluna de flotação de barita já apresentava praticamente todos os seus requisitos dentro das especificações de projeto.

Apesar dos resultados satisfatórios obtidos na coluna de flotação de barita terem sido alcançados rapidamente, procura-se constantemente a melhoria de operação do equipamento. Para isto são realizados constantemente ensaios na coluna de flotação piloto com o objetivo de verificação do desempenho da unidade industrial.

7.8 Comparação entre os parâmetros operacionais projetados e os atuais em operação

A unidade industrial de flotação de barita em coluna apresenta-se em operação a aproximadamente 1,5 anos. A comparação dos resultados obtidos na unidade industrial comparativamente à unidade piloto pode ser feita a partir dos dados de controle operacional que são obtidos diariamente.

Realizou-se um levantamento das condições de operação da coluna industrial desde maio de 1994 até maio de 1995, envolvendo os dados diários do controle operacional, bem como resultados de amostragens específicas na usina. Não foram considerados neste levantamento os períodos em que a instalação não operou satisfatoriamente por motivo de problemas alheios à flotação barita, bem como os períodos de instabilidade ocorridos nas mudanças de minérios.

A comparação dos resultados industriais com os piloto foi realizada em quatro itens:

- . condicionamento dos reagentes,
- . consumo de reagentes,
- . condições operacionais da coluna de flotação,
- . resultados metalúrgicos.

CONDICIONAMENTO DOS REAGENTES

A partir dos ensaios de condicionamento realizados em escala de bancada e piloto, onde ficou evidente a importância deste na flotação de barita, procurou-se

trabalhar na unidade industrial com os parâmetros bem próximos aos utilizados nos ensaios piloto.

O condicionamento da unidade industrial é realizado em um condicionador tipo tanque agitado onde é controlado o pH da polpa em 9,5 e são adicionado os reagentes (espumante e coletor). A porcentagem de sólidos fica em torno de 56 %, com tempo de residência de 5 a 7 minutos. Estes parâmetros coincidem exatamente com os utilizados nos ensaios piloto, conforme mostrado na tabela 7.12.

O condicionamento industrial seguiu rigorosamente os critérios dos ensaios piloto.

CONSUMO DE REAGENTES

A unidade industrial de flotação em coluna utiliza os mesmos reagentes utilizados na unidade industrial (Flotanol D14 e Flotisor S72).

O consumo de reagentes depende basicamente de dois fatores importantes:

- . teor de barita na alimentação da flotação, bem como a sua liberação, distribuição por malha e tipos de cristalização,
- . necessidade de recuperação de barita devido ao fato da flotação de apatita ser posterior à de barita.

As dosagens de reagentes (espumante e coletor) na unidade industrial foram decorrência dos parâmetros acima citados, ocorrendo portanto variações em seus valores conforme a necessidade. Contudo, ao avaliar um período mais amplo de

**TABELA 7.12 - COMPARAÇÃO DO CONDICIONAMENTO DOS REAGENTES
ENTRE A UNIDADE PILOTO E A INDUSTRIAL**

ITEM	UNIDADE PILOTO ¹	UNIDADE INDUSTRIAL ²
PORCENTAGEM DE SÓLIDOS (%)	55-57	55-57
CONDICIONADOR	TANQUE AGITADO	TANQUE AGITADO
TEMPO MÉDIO DE RESIDÊNCIA	4-6	5-7
pH	9,5	9,5
ADIÇÃO DE ESPUMANTE	SIM	SIM
ADIÇÃO DE COLETOR	SIM	SIM

NOTAS:

- 1 - Unidade piloto de flotação em coluna (o = 24")
- 2 - Unidade industrial de flotação em coluna (3,0 m x 4,5 m x 14,5 m) - valores típicos de 1994

operação verifica-se que estas oscilações são atenuadas, sendo que os consumos de reagentes na unidade industrial são praticamente os mesmos dos ensaios otimizados realizados na unidade piloto.

O pH de condicionamento dos reagentes foi controlado em 9,5, contudo em algumas pilhas que apresentaram necessidade de maior recuperação de barita foi utilizado pH na faixa de 9,6 a 9,8.

O consumo de espumante foi de 30 a 40 g/t e de coletor em torno de 120 g/t. A adição de espumante foi maior em algumas pilhas de minério que apresentaram necessidade de maior controle da qualidade da espuma.

Em geral os consumos dos reagentes foram os mesmos dos ensaios piloto de flotação em coluna, conforme é mostrado na tabela 7.13. Este fato comprova a expectativa de diminuição de consumo de espumante e coletor de barita com a utilização da flotação em coluna.

CONDIÇÕES OPERACIONAIS DA COLUNA DE FLOTAÇÃO

As condições operacionais da coluna de flotação de barita da unidade industrial comparativamente às condições da unidade piloto são mostradas na tabela 7.14 [119].

A velocidade da água de chuveiro utilizada na coluna de flotação industrial apresenta valor 25 % inferior ao utilizado na piloto. Isto ocorre devido à diminuição do efeito de parede na unidade industrial, comparativamente à piloto. Existe uma tendência de diminuição da velocidade da água de chuveiro com o aumento do diâmetro equivalente da coluna.

TABELA 7.13 - COMPARAÇÃO DO CONSUMO DE REAGENTES ENTRE
A UNIDADE PILOTO E A INDUSTRIAL

ITENS	UNIDADE	INSTALAÇÃO PILOTO ¹	INSTALAÇÃO INDUSTRIAL ²
MODULADOR DE pH			
pH		9,5	9,5
SODA (100 %)	g/t alim.	150-200	140-220
	g/t flot.	1,5-2,0	1,4-2,2
ESPUMANTE			
FLOTANOL D14	g/t alim.	30-40	30-40
	g/t flot.	300-400	300-400
COLETOR			
FLOTINOR S72	g/t alim.	100-130	100-130
	g/t flot.	1,0-1,3	1,0-1,3

NOTAS:

- 1 - Unidade piloto de flotação em coluna ($\phi = 24''$)
- 2 - Unidade industrial de flotação em coluna (3,0 m x 4,5 m x 14,5 m) - valores típicos de 1994

TABELA 7.14 - COMPARAÇÃO DAS CONDIÇÕES OPERACIONAIS DA COLUNA DE FLOTAÇÃO ENTRE A UNIDADE PILOTO E A INDUSTRIAL

ITENS	UNIDADE	INSTALAÇÃO PILOTO ¹	INSTALAÇÃO INDUSTRIAL ²

PORCENTAGEM DE SÓLIDOS	%		
ALIM. FLOTADO		45	45
NÃO FLOTADO		25-35	40-42
		35-45	27-32
AERADOR			
VELOCIDADE	cm/s	0,9-1,2	0,9-1,1
PRESSÃO	kgf/cm ²	4,5	5,5
CAPACIDADE	kg/Nm ³	29-39	45-55
ÁGUA DE LAVAGEM			
VELOCIDADE	cm/s	0,16	0,12
"BIAS"	cm/s	0,08	0,04
CAPACIDADE	kg/m ³	220	300
TEMPO MÉDIO DE RESIDÊNCIA	min	15-20	15-20
CAPACIDADE DE CARREAMENTO	t/h/m ²	1,0-1,5	1,5-2,0
"LIP LOADING"	kg/h/m	185-195	600-700

NOTAS:

- 1 - Unidade piloto de flotação em coluna (o = 24")
- 2 - Unidade industrial de flotação em coluna (3,0 m x 4,5 m x 14,5 m) - valores típicos de 1994

Este fato proporciona uma maior massa de material flotado por unidade de água de lavagem.

A utilização de menor velocidade de água de chuveiro proporcionou maior porcentagem de sólidos do material flotado na unidade industrial comparativamente à piloto.

A faixa da velocidade de ar utilizada na unidade industrial é a mesma utilizada na unidade piloto, sendo que a massa flotada por unidade de volume apresenta cerca de 50 % superior na industrial. Este fato sugere que o parâmetro mais importante para "scale-up" do ar é a velocidade do ar.

A capacidade de carreamento da unidade industrial tem apresentado valores em torno de 40 % superiores aos obtidos na unidade piloto. Este fato ocorre devido à impossibilidade de realização de ensaios piloto com taxa de alimentação em valores que pudessem atingir os limites da capacidade de carreamento, devido a problemas de bombeamento e transferência de polpa.

O "lip loading" obtido na unidade industrial foi cerca de 3,5 vezes superior aos valores da escala piloto. Uma unidade de grande porte apresenta menor perímetro para transbordo do concentrado, sendo muitas vezes necessária a utilização de calhas internas. A flotação de barita na unidade industrial não tem apresentado problemas de recuperação de barita que pudessem ser devidos à necessidade de mais borda para transbordo do concentrado. O limite portanto do "lip loading" é bem superior ao valor encontrado na unidade piloto, podendo até mesmo ser superior ao obtido na unidade industrial.

Os parâmetros analisados mostram coerência dos dados obtidos na unidade industrial com os previstos a partir dos ensaios piloto principalmente velocidade do ar, tempo de residência e capacidade de carregamento.

RESULTADOS OPERACIONAIS

Os resultados metalúrgicos da flotação de barita na unidade industrial, de uma forma geral, reproduziram os resultados obtidos em escala piloto (figura 7.15).

A flotação de barita em escala piloto apresenta em média uma tendência a obtenção de flotado com teores ligeiramente superiores de BaSO_4 , contudo esta diferença não é significativa para comprometer o resultado da flotação.

A reprodução dos resultados da unidade piloto garantiram melhor controle da flotação de apatita, com possibilidade de obtenção de concentrados apatíticos de menor teor de barita, bem como a diminuição da perda de apatita que é um item de grande importância na análise econômica. A perda de apatita ficou na faixa de 1,5 a 2,5 % garantindo a economicidade do projeto.

Analisando-se os resultados obtidos na unidade industrial de flotação em coluna para barita comprovamos a expectativa dos resultados da unidade piloto. Ressalta-se a qualidade das informações dos ensaios piloto, comprovação da validade das equações de dimensionamento e o sucesso da fabricação e montagem do circuito industrial.

**TABELA 7.15 - COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS METALÚRGICOS ENTRE
A UNIDADE PILOTO E A INDUSTRIAL**

ITENS	UNIDADE	INSTALAÇÃO PILOTO ¹	INSTALAÇÃO INDUSTRIAL ²
ALIMENTAÇÃO DA FLOTAÇÃO	%		
BaSO ₄		9-12	9-12
P ₂ O ₅		18-21	18-21
CaO		24-26	24-26
FLOTADO	%		
BaSO ₄		83-87	80-85
P ₂ O ₅		2-4	3-5
CaO		3-5	5-7
NÃO FLOTADO	%		
BaSO ₄		1,0-1,2	1,0-2,0
P ₂ O ₅		22-24	22-24
CaO		27-29	27-29
RECUPERAÇÃO	%		
MASSA		9-11	9-10
BARITA		82-87	80-85
APATITA		1,5-2,3	1,5-2,5

NOTAS:

- 1 - Unidade piloto de flotação em coluna ($\phi = 24''$)
- 2 - Unidade industrial de flotação em coluna (3,0 m x 4,5 m x 14,5 m) - valores típicos de 1994

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo da flotação de barita em coluna apresentou bons resultados devido a vários fatores:

- a . utilização de uma unidade piloto de flotação em coluna com características muito próximas de uma unidade industrial,
- b . possibilidade de verificar o desempenho de pontos críticos de um projeto industrial em escala piloto, tais como: geometria do chuveiro de lavagem de concentrado, sistema de geração de bolhas (Cominco), instrumentação (aerador e controle de nível),
- c . exaustivo estudo de processo em escala piloto com o objetivo de determinação das condições ótimas de cada uma das variáveis importantes na flotação de barita,
- d . exaustivo estudo de cinética de flotação em escala piloto com o objetivo de avaliar as variáveis que influenciam a cinética de flotação da barita,
- e . realização de ensaio de longa duração com o objetivo de avaliar a reprodutividade dos resultados e confirmação das melhores condições obtidas,

- f . utilização de equações de modelamento da coluna de flotação, realizando simulações em microcomputador (geometria e condições operacionais da coluna de flotação) para obter um dimensionamento da unidade industrial considerando condições normais e anormais,
- g . realização de um estudo econômico detalhando os itens envolvidos no projeto, bem como análise de sensibilidade,
- h . projeto, fabricação e montagem com acompanhamento da equipe de processo da Arafertil,
- i . "start up" da instalação industrial realizada pela equipe de processo da Arafertil,
- j . envolvimento da equipe de operação e manutenção da unidade de beneficiamento com o projeto, tendo sido avaliadas as opiniões e experiência destes, bem como realizado treinamento prévio dos supervisores e operadores na unidade piloto.

O cumprimento de todas as atividades acima citadas (montagem da unidade piloto de flotação, realização dos ensaios piloto para otimização de processo e para dimensionamento, simulações via microcomputador, projeto, fabricação, montagem e "start up") garantiu os bons

resultados obtidos na flotação de barita em coluna de flotação.

9 CONCLUSÕES

O presente trabalho apresenta as seguintes conclusões:

- a . a montagem e a operação da unidade piloto de flotação em coluna foram bem sucedidas, sendo confiáveis as informações obtidas dos ensaios realizados nesta instalação,
- b . o controle da unidade piloto de flotação em coluna apresentou as seguintes características: controle da vazão de polpa por escoamento em orifício, controle do nível da coluna de flotação através de sensor pneumático atuando na válvula de rejeito, controle da pressão do misturador pela vazão de água por bomba de deslocamento positivo (tipo Nemo); fornecendo subsídios para o projeto industrial,
- c . devido ao fato da realização de ensaios "on line" com a usina industrial, foi possível verificar a estabilidade da coluna de flotação frente às oscilações normalmente existentes no circuito industrial: porcentagem de sólidos, taxa de alimentação, qualidade de minérios e períodos de instabilidade devido a mudança de pilha a ser retomada para o beneficiamento,

- d . o tamanho da coluna piloto de flotação possibilitou a avaliação do sistema de lavagem de concentrado com chuveiro apresentando a mesma geometria do chuveiro industrial (interno à camada de espuma) sendo verificado seu bom desempenho na unidade industrial,
- e . foi possível avaliar o bom desempenho do aerador da Cominco em escala piloto, bem como a sua instrumentação e controle, sendo possível utilizar o mesmo conceito na unidade industrial confirmando os resultados,
- f . os resultados obtidos na unidade piloto de flotação mostraram a possibilidade de flotação de barita em um único estágio , resultado confirmado na operação da unidade industrial,
- g . os valores das principais variáveis (dosagem de reagentes, pH, porcentagem de sólidos) obtidos na unidade piloto foram confirmados na unidade industrial,
- h . devido ao fato dos reagentes da flotação de barita não necessitarem de altos tempos de condicionamento, foi utilizado somente um tanque condicionador tanto na unidade piloto quanto na industrial,

- i . nos ensaios piloto de flotação em coluna a dosagem de espumante e coletor ficou cerca de 20% e 25% respectivamente menor que a dosagem dos mesmos reagentes na unidade industrial (célula mecânica) para a mesma recuperação de barita e melhor seletividade, desempenho confirmado em escala industrial,

- j . o aumento do pH do condicionamento proporcionou maior recuperação de barita até o pH = 9,5; a partir deste valor ocorre maior perda de apatita no concentrado de barita sem aumento significativo da recuperação de barita,

- k . a espessura da camada de espuma mostrou ser uma das variáveis de maior importância na estabilidade da flotação, influenciando diretamente na recuperação; camadas de espuma acima de 40 cm provocaram fragilidade na espuma dificultando o seu transbordo, provocando queda de recuperação,

- l . velocidades de ar do aerador acima de 1,2 cm/s provocaram queda de recuperação,

- m . porcentagens de sólidos da alimentação da coluna até 49% de sólidos não apresentaram efeitos prejudiciais à flotação de barita, favorecendo o tamanho da coluna de flotação,

- n . a unidade piloto de flotação em coluna apresentou boa flexibilidade para realização dos ensaios para dimensionamento da unidade industrial,
- o . a constante cinética de flotação proporcionou tempo de residência relativamente baixo para a flotação de barita,
- p . o modelo de dimensionamento de Yianatos, Espinosa-Gomez, Laplante e Dobby, baseado na constante cinética e no número de dispersão, mostrou ser adequado para "scale up" da zona de recuperação de uma unidade industrial a partir de dados de uma unidade piloto,
- q . a zona de limpeza foi dimensionada pela capacidade de carregamento e "lip loading", sendo que para o "lip loading" foi assumido valor superior ao obtido na piloto, contudo com bons resultados industriais,
- r . os resultados metalúrgicos obtidos em escala industrial comprovaram o aumento de seletividade na flotação, diminuindo a perda de apatita no concentrado de barita para 1,5 - 2,0%, para um mesma recuperação de barita,
- s . a flotação de barita em célula de coluna proporcionou melhoria de controle não só desta flotação como também da flotação de apatita subsequente, fornecendo possibilidade de produção de um concentrado mais rico em apatita (melhor qualidade) se necessário,

t . os resultados industriais comprovaram a expectativa da análise econômica do investimento, confirmando ser a flotação em coluna mais adequada que a flotação em célula mecânica para a flotação de barita.

A flotação em coluna proporcionou uma melhor flexibilidade na operação da usina de beneficiamento da Arafertil, retorno econômico do investimento e um melhor entendimento do processo de flotação.

A mudança de enfoque que a flotação em coluna trouxe à Arafertil mostra que é sempre possível melhorarmos o estágio em que se encontra o processo. O processo de flotação ganhará um novo impulso, abrindo possibilidade para testarmos novas condições de processo, novas máquinas de flotação, novos reagentes, buscando maior eficiência através de menor custo e melhor qualidade.

10 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com a implantação da flotação de barita em coluna na usina de beneficiamento da Arafertil alguns trabalhos adicionais merecem destaque:

- a . desenvolver uma metodologia para realizar ensaios de flotação em coluna em regime de batelada com o objetivo de acompanhar o processo, realizando ensaios expeditos buscando avaliar a influência de variáveis (reagentes, ar, água, porcentagem de sólidos e outras) na flotação de barita,
- b . avaliar o comportamento da cinética de flotação para a flotação de barita numa coluna em regime de batelada e comparar com unidades em escala contínua: unidade piloto de flotação em coluna (61 cm x 10,4 m) e unidade industrial (3,0 m x 4,5 m x 14,5 m),
- c . avaliar a influência de variáveis (teores, granulometria, velocidade do ar, camada de espuma, velocidade da água de lavagem, etc.) na constante cinética,
- d . avaliar a distribuição do tempo de residência em coluna piloto e industrial e comparar os resultados,

- e . estabelecer metodologia para determinar a recuperação da zona de limpeza em coluna piloto e industrial e comparar os resultados,
- f . avaliar a interferência de íons na flotação de barita em coluna de flotação (cálcio, magnésio, bário, sódio, fluoreto, fosfato e outros), através da unidade de ensaios em batelada,
- g . avaliar o comportamento dos íons a luz de diagramas de equilíbrio de espécies iônicas, procurando subsídios físico-químicos para a explicação dos fenômenos ocorridos,
- h . realizar estudos de flotação em tubo de Hallimond modificado com o objetivo de fundamentar as explicações para a flotação de barita em minérios fosfáticos,
- i . desenvolver metodologia para determinação de isotermas de abstração de coletores de barita e apatita em minerais puros (barita e apatita).

Os trabalhos acima sugeridos fornecerão subsídios para o melhor entendimento da flotação de barita em minérios fosfáticos, através da comparação de parâmetros entre coluna piloto e industrial e de uma avaliação mais específica dos aspectos físico-químicos da flotação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 . YIANATOS, J.B.; ESPINOSA-GOMEZ, R.; FINCH, J.A.; LAPLANTE, A.R.; DOBBY, G.S. Effects of Column Height on Flotation Column Performance, Minerals and Metallurgical Performance, p.11-14, Feb. 1988
- 2 . BRAGA, J.R.K. Jazida de fosfato do Barreiro, Arafertil, p.1-6, maio 1987 (Relatório Interno)
- 3 . SACHS, P.F.T.; COSTA, L.S Aumento da Produtividade da Usina de Beneficiamento de Fosfato da Arafertil, p.1-5, março 1986 (Relatório Interno)
- 4 . GASPAR, J.C.; TORRES, M.G.; FILHO, F.S. Caracterização do Minério Fosfático do Complexo Carbonatítico do Barreiro, Araxá, MG, Caracterização Mineralógica e Química de Minérios e Rejeitos de Depósitos Mineraiis Brasileiros, UNB, 1995 /No prelo/
- 5 . BRAGA, J.R.K.; BORN, H. Intrusão Alcalina de Araxá, Arafertil, p.1-3, 1988 (Relatório Interno)
- 6 . BRAGA, J.R.K.; BORN, H. Características Geológicas e Mineralógicas da Mineralização Apatítica de Araxá, p.1-8 1987 (Relatório Interno)
- 7 . ISSA FILHO, A.; LIMA, P.R.A.S.; SOUZA, O.M. Aspectos da Geologia do Complexo Carbonatítico do Barreiro, Araxá, MG, Brasil, Complexos Carbonatíticos do Brasil, CBMM, Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração, São Paulo, p.19-44, 1984
- 8 . RODRIGUES, C.S.; LIMA, P.R.A.S. Complexos Carbonatíticos do Brasil, Complexos Carbonatíticos do Brasil, CBMM, Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração. São Paulo, p.1-17, 1984
- 9 . SILVA, R.M. Minerais Associados às Apatitas: Análise de sua Influência na Produção de Ácido Fosfórico e Fertilizantes Fosfatados, Araxá, 1994, p.9-18,33-36, Dissertação (Mestrado), Universidade de São Paulo
- 10 . REIS, J.P.; TAKATA, L.A.; SACHS, P.F.T.; ASSIS, J.M.N.; FARID, M.A.; BRAGA, J.R.K.; BORN, H. Definição dos Materiais Mineralizados Magnesiano-Carbonatíticos, a Serem Submetidos a Estudos Tecnológicos, Arafertil, p.1-3, 1988 (Relatório Interno)

- 11 . TAKATA, L.A.; SACHS, P.F.T.; ASSIS, J.M.N. **Caracterização Tecnológica de Fosfatos Aplicada ao Planejamento de Lavra da Arafertil**, Congresso Brasileiro de Mineração, Brasília, IBRAM, v. 2, p.78-95, 1985
- 12 . TAKATA, L.A.; ASSIS, J.M.N. **Caracterização de Minérios Aplicada ao Planejamento e Controle de Lavra de Fosfato, Arafertil**, p.1-4, 1994 (Relatório Interno)
- 13 . LUZ, A.B. ; ALMEIDA, S.L.M. **Manual de Usinas de Beneficiamento - Usina de Beneficiamento de Fosfato da Arafertil**, Rio de Janeiro, CETEM/CNPq/DNPM/FINEP, p.53-58, 1989
- 14 . TEIXEIRA, S.H.A. **Descrição Resumida do Beneficiamento de Minério, Arafertil**, p.1-3, 1995 (Relatório Interno)
- 15 . FILHO, L.S.L.; MATAI, P.H.L.; SILVA, G.A. **O Uso de Tensoativos na Indústria de Fertilizantes**, Brasil Mineral n^o 85, p.36-37, janeiro/fevereiro de 1991
- 16 . RIBEIRO, R.; TAKATA, L.A.; SACHS, P.F.T.; ASSIS, J.M.N. **Processo para Obtenção de Concentrados de Barita**, Pedido de Previlégio (8.301.804), Instituto Nacional de Propriedade Industrial, p.1-9, 1983
- 17 . DANA, J.D. **Manual de Mineralogia**, volume 2, Ao Livro Técnico, Rio de Janeiro, 1^a edição, p.387-391, 1970
- 18 . RANGEL, E.A. **Estudo Sobre Possibilidade de Usos da Barita de Araxá, Arafertil**, p.2-47, dezembro de 1980 (Relatório Interno)
- 19 . GUIMARÃES, R.C. **Caracterização do Concentrado de Barita da Arafertil**, setembro de 1988, p.2-5, (Relatório Interno)
- 20 . ----- **Determinação da Massa Específica - NBR 6474**, Associação Brasileira de Normas Técnicas, p.1-4, 1984
- 21 . PERES, A.E.C. **Curso de Tratamento de Minérios**, EEUFMG, ABM, p.4-8, outubro 1989
- 22 . SILVA, A.T. **Curso de Tratamento de Minérios - Concentração de Minerais por Flutuação**, vol III, cap I, Edições COTEC, p.I.1 - I.15, 1987
- 23 . ----- **Selective Flotation: An Art as Well as a Science**, Mining Engineering, p.275-276, March 1982
- 24 . KLIMPEL, R.R. **Froth Flotation - An Old Process With a New Out Look**, Mining Magazine, p.266-267, May 1993

- 25 . WILLS, B.A. **Mineral Processing Technology**, Second Edition, Pergamon Press, p.319-334, 1981
- 26 . LEJA, J. **Surface Chemistry of Froth Flotation**, Plenum Press, New York, p.106-117, December 1983
- 27 . PERES, A.E.C. **Máquinas de Flotação**, Curso de Tratamento de Minérios, ABM - Fundação Cristiano Ottoni, EEUFMG, Belo Horizonte, MG, p.120-127, 1988
- 28 . POLING, G.W. **Selection and Sizing of Flotation Machines**, Mineral Processing Plant Design, 2nd Edition, Society of Mining Engineers, New York, U.S.A., p.35-39, 1980
- 29 . YOUNG, P. **Flotation Machines**, Mining Magazine, January p.35-59, 1992
- 30 . SILVA, A.T. **Máquinas ou Células de Flutuação**, Curso de Tratamento de Minérios - Concentração de Minerais por Flutuação, vol III, Edições COTEC, p. VII.9 - VII.21, 1997
- 31 . ----- **Pneumatic Flotation - Ekof**, folheto da ERZ- und Kohleflotation GmbH, p.6-9
- 32 . ----- **Review of Flotation Equipment**, Course Notes Preparation and Lectures by Minnovex Technologies Inc., Toronto, Canadá, 1993.
- 33 . FINCH, J.A.; DOBBY, G.S. **Column Flotation**, Pergamon Press, 1990
- 34 . ----- **Column Flotation**, Bureau do Mines, United States Department of the Interior, p.1-7, March 1988
- 35 . WHEELER, D.A. **Historical View of Column Flotation Development**, Column Flotation '88, International Symposium on Column Flotation, SME Annual Meeting, Phoenix, Arizona, Editor K.V.S. Sastry, p.3-4, January 25-28, 1988
- 36 . ESTEBAN, F.S.; SCALABRIO, R.; CHAMMA, M.; OLIVEIRA, R.N. **Um Promissor Desenvolvimento em Equipamento para Flotação**, p.2-3, 1985 (Relatório Interno da Serrana S.A.)
- 37 . REIS, J.B.; PERES, A.E.C. **Industrial Application of Flotation Columns in the Concentration of a Sulphide Ore at Mineração Manati Ltda. - Brazil**, International Conference on Column Flotation, Sudbury, Canada, p.524-537, 1991

- 38 . VIANA, P.R.M.; RABELO, P.J.B.; COELHO, A.G.; SILVA, J.P.; SILVA, V.C.; JULIÁ, M.F. **Column Flotation for the Expansion of the Flotation Circuit at Samarco Mineração, Brazil**, International Conference on Column Flotation, Sudbury, Canada, p.89-97, 1991
- 39 . ----- **Deister Flotaire, Column Flotation Cell**, folheto da Deister Concentrator Company, Inc. p.1-3
- 40 . YANG, D.C. **Technical Advantages of Packed Flotation Columns**, International Conference on Column Flotation, Sudbury, Canada, p.631-634, 1991
- 41 . CLAYTON, R.; JAMESON, G.J.; HARBORT, G.; MANLAPIG E.V.; HUNT, K.; HENDERSON, T. **Jameson Cell Applications in Flotation**, AIME Conference, Arizona, E.U.A., 1990
- 42 . PERES, A.E.C. ; ARAUJO, A.C. **Células de Flotação: Novas Tendências e Panorama Brasileiro**, Flotação, Fundamentos, Prática e Meio Ambiente, Anais do III Encontro do Hemisfério Sul sobre Tecnologia Mineral e XV Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Hidrometalurgia, São Lourenço, MG, Brasil, Publicação ABTM, p.605-615, 1992
- 43 . KENNEDY, A. **The Jameson Flotation Cell**, Mining Magazine, p.181, October 1990
- 44 . ----- **Jameson Cell**, folheto da MIM Technology Marketing Ltda., Northfleet, England, p.2-3, 1993
- 45 . FURTADO, J.R.V.; PERES, A.E.C. **Flotação em Coluna**, Curso de Beneficiamento de Minérios, Associação Brasileira de Metais, Fundação Cristiano Ottoni, EEUFMG, p.128-132, 1988
- 46 . YANATOS, J.B.; BERGH, L.G. **Parametros de Diseño y Operacion de Columnas de Flotacion**, Flotação, Fundamentos, Prática e Meio Ambiente, Anais do III Encontro do Hemisfério Sul sobre Tecnologia Mineral e XV Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Hidrometalurgia, São Lourenço, MG, Brasil, Publicação ABTM, p.511-528, 1992
- 47 . XU, M., FINCH, J.A. **Maximun Gas and Bubble Surface Rates in Flotation Columns**, Int. Journal of Mineral Processing, 1990
- 48 . FINCH, J.A., DOBBY, G.S. **Particle Size Dependence in Flotation Derived from a Fundamental Model of the Capture Process**, International Journal of Mineral Processing, 21, p.252-253, 1987

- 49 . RICE, R.; TUPPERAINEN, J.M.I.; HEDGE, R.M. Dispersion and Hold-up in Bubble Column - Comparison of Rigid and Flexible Spargers, The Canadian Journal of Chemistry Engineering, vol. 59, p.677-681, December 1981
- 50 . CRAWFORD, R.; RALSTON, J. The Influence of Particles Size and Contact Angle in Mineral Flotation, International Journal of Mineral Processing, 23, p.4-9, 1988
- 51 . FLINT, I.M. Flotation Technology and Flotation Columns, CSS - Coastal Separation System, Richmond, Canada, p.2-3, 1993
- 52 . MOYS, M.H., ENGELBRECHT, J., TERBLANCHE, N. The Design of Baffles to Reduce Axial Mixing in Flotation Columns, Multotec, p.5-7, 1991
- 53 . AMELUNXEN, R.L. Lip Loading Considerations in Flotation Columns, International Conference on Column Flotation, Sudbury, Canada, p.662-671, 1991
- 54 . RASEMANN, W. On the Attachment Probability of Bubble/Particle Contacts in Solid/Liquid Suspension, International Journal of Mineral Processing, 24, .247-249, 1988
- 55 . YIANATOS, J.B.; BERGH, L.G. RTD Studies in an Industrial Flotation Column: Use of Radioactive Tracer Technique, International Conference on Column Flotation, Sudbury, Canada, p.227-233, 1991
- 56 . DOBBY, G.S.; FINCH, J.A. Mixing Characteristics of Industrial Flotation Columns, Chemical Engineering Science, vol. 40, p.1061-1067, 1985
- 57 . MURDOCK, D.J. Technology Development - An Overview of Column Flotation, Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, p.3, March 1991
- 58 . BERGH, L.G.; YIANATOS, J.B. Advances in Flotation Column Dynamics and Measurements, International Conference on Column Flotation, Sudbury, Canada, p.409-415, 1991
- 59 . MURDOCK, D.J.; TUCKER, R.J.; JACOBI, H.P. Column Cells vs Convencional Flotation, A Cost Comparison, International Conference on Column Flotation, Sudbury, Canada, p.653-656, 1991
- 60 . BROOKS, M.J.; FLEMING, I.T.R. Modernization of the Nchanga Flotation Plant, A Comparison of Flotation Cells and Columns, Mining Magazine, p.38-39, July 1989

- 61 . MOON D.S.; SIROIS, L.L. **Theory and Industrial Application of Column Flotation in Canada**, Column Flotation '88, International Symposium on Column Flotation, SME Annual Meeting, Phoenix, Arizona, Editor K.V.S. Sastry, January 25-28, p.91-103, 1988
- 62 . MURDOCK, D.I. **Column Cells Continue to Find New Applications**, Mining Magazine, p.239-241, May 1993
- 63 . YIANATOS, J.B. **Nuevos Avances en la Tecnologia de Columnas de Flotacion**, Minería Chilena, n^o 125. p.59-62, Noviembre de 1991
- 64 . LEVENSPIEL, O. **Engenharia das Reações Químicas**, volume I, Editora Edgard Blücher Ltda, p.78-128, 1974
- 65 . JAMESON, G.J.; NAM, S.; YONG, M.M. **Physical Factors Affecting Recovery Rates in Flotation**, Minerals Science Engineering, vol. 9, n^o 3, p.113-115, July 1977
- 66 . FORMOSINHO, S.J. **Fundamentos de Cinética Química**, Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, p.57-62, 1982
- 67 . HILL, C.G. **An Introduction to Chemical Engineering Kinetics and Reactor Design**, John Wiley & Sons, U.S.A., p.245-288, 1977
- 68 . WEHNER, J.F.; WILHELM, R.H. **Boundary Conditions of Flow Reactor**, Chemical Engineering Science, vol. 6, p.89-92, 1956
- 69 . DOBBY, G.S.; FINCH, J.A. **Mixing Characteristics of Industrial Flotation Columns**, Chemical Engineering Science, vol. 40, n^o 7, p.101-1068, 1991
- 70 . YIANATOS, J.B.; FINCH, J.A., LAPLANTE, A.R. **Apparent Hindered Settling in Gas-Liquid Slurry Countercurrent**, Chemical Engineering Science, vol. 18, p.155-165, 1990
- 71 . DOBBY, G.S., FINCH, J. **Flotation Column Scale-up and Modelling**, CIM-Bulletin, 89-96, May 1986
- 72 . WOODBURN, E.T.; LOVEDAY, B.K. **The Effect of Variable Residence Time on the Performance of a Flotation System**, Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, p.616-620, July 1965
- 73 . WILSON, S.W.; STRATTON-CRAWLEY, R. **Design of Production Scale Flotation Columns Using a First Order Kinetic Model**, International Conference on Column Flotation, Sudbury, Canada, p.165-177, 1991

- 74 . FERNANDES, M.D. **Coleta de Partículas em Colunas de Flotação**, nota técnica CT3-NT-21/91, CDTN - Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, p.3-11, 1991
- 75 . FERNANDES, M.D. **Estimativa do Diâmetro de Bolhas em Colunas de Flotação**, nota técnica DEPR - NT-01/91, CDTN - Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, p.2-8, 1991
- 76 . FERNANDES, M.D. **Cálculo do Diâmetro de Bolhas em Colunas de Flotação para o Sistema Ar/Água**, nota técnica CT3-NT-17/91, CDTN - Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, p.3-9, 1991
- 77 . VILLAR, R.; FINCH, J.A.; YIANATOS, J.B.; LAPLANTE, A.R. **Column Flotation Simulations**, Proceedings of the First Canadian Conference on Computer Applications in the Mineral Industry, Quebec, March 1988
- 78 . SEPULVEDA, J.E.; GUTIERREZ, L. **Dimensionamiento y Optimizacion de Plantas Concentradoras Mediante Tecnicas de Molelacion Matematica**, CIMM - Centro de Investigacion Minera y Metalurgica, Santiago, Chile, 1986
- 79 . DOBBY, G.S., FINCH, J.A. **Particle Collection in Column - Gas Rate and Bubble Size Effects**, Canadian Metallurgical Quartely, vol. 25, n^o 1, p.9-13, 1986
- 80 . BAIRD, M.H.I.; RICE, R.G. **Axial Dispersion in Large Unbaffled Column**, The Chemical Engineering Journal, p.171-174, September 1975
- 81 . XU, M.; FINCH, J.A. **Estimating Vessel Dispersion Number in Flotation Columns**, International Conference on Column Flotation, Sudbury, Canada, p.437-454, 1991
- 82 . FERNANDES, M.D. **Correlação Entre Dimensões e Performance de Colunas de Flotação**, Flotação, Fundamentos, Prática e Meio Ambiente, Anais do III Encontro do Hemisfério Sul sobre Tecnologia Mineral, XV Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Hidrometalurgia, São Lourenço, MG, Brasil, Publicações ABTM, p.530-548, 1992
- 83 . DOBBY, G.S.; YIANATOS, J.B.; FINCH, J.A. **Estimation of Bubble Diameter in Flotation Columns from Drift Flux Analysis**, Canadian Metallurgical Quartely, vol. 27, n^o 2, p.85-90, 1988
- 84 . YIANATOS, J.B.; FINCH, J.A.; LAPLANTE, A.R. **Selectivity in Column Flotation Froths**, International Journal of Mineral Processing, p.279-282, 1988

- 85 . CONTINI, N.J.; WILSON, S.W.; DOBBY, G.S. **Measurement of Rate Data in Flotation Columns**, Column Flotation '88, International Symposium on Column Flotation, SME Annual Meeting, Phoenix, Arizona, Editor K.V.S. Sastry, p.81-89, January 25-28, 1988
- 86 . FALUTSU, M.; DOBBY, G.S. **Direct Measurement of Froth Drop Back and Collection Zone Recovery in a Laboratory Flotation Column**, Minerals Engineering, p.3.11, 1989
- 87 . AQUINO, J.A.; LUZ, I.L.O.; COELHO, S.V. **Fluxograma de Processo e Balanço de Massa da Unidade Semi-Industrial de Flotação em Coluna - Arafertil**, CDTN - Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, Belo Horizonte, p.2-6, março de 1991
- 88 . GUIMARÃES, R.C.; TAKATA, L.A. **Memorial Descritivo do Projeto da Coluna Piloto de Flotação**, p.1-6, 1991 (Relatório Interno da Arafertil)
- 89 . AQUINO, J.A. **Descrição dos Equipamentos e Recomendações para Projeto da Unidade Semi-Industrial de Flotação em Coluna**, CDTN - Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, Belo Horizonte, p.3-11, abril de 1991
- 90 . AQUINO, J.A. **Projeto Conceitual da Coluna de Flotação Semi-Industrial da Arafertil**, CDTN - Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, Belo Horizonte, p.1-2, abril de 1991
- 91 . ----- **Sparger Manual for Cominco Air Sparging System**, Cominco Engineering Services Ltd., Vancouver, Canada, p.3-5, August 1990
- 92 . MURDOCK, D.J.; WYSLOUZIL, H.E. **Large-Diameter Column Flotation Cells Take Hold**, Engineering Mining Journal, p.38, August 1991
- 93 . ----- **Sistema de Água de Lavagem para a Coluna de Flotação Semi-Industrial da Arafertil**, CDTN - Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Mineral, Belo Horizonte, p.1-3, maio de 1991
- 94 . LUZ, I.L.O. **Fluxogramas Simplificados para os Circuitos de Ar e Água da Coluna de Flotação Semi-Industrial da Arafertil**, CDTN - Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, Belo Horizonte, p.1-5, maio de 1991
- 95 . ----- **Statement of Qualifications - Column Flotation Technology**, Column Cell Technology Division of Cominco Engineering Services Ltd., Vancouver, Canadá, p.6-7, 1991

- 96 . COIMBRA, A. Projeto da Instalação Piloto de Flotação em Coluna, p.1-6, 1992 (Relatório Interno da Arafertil)
- 97 . GUIMARÃES, R.C.; COIMBRA, A. Cronograma da Instalação Piloto de Flotação em Coluna, p.2-3, 1991 (Relatório Interno da Arafertil)
- 98 . AQUINO, J.A.; OLIVEIRA, M.L.M.; JÚNIOR, W.E.P. Pré-Operação da Unidade Semi-Industrial de Flotação em Coluna da Arafertil, CDTN - Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, p.3-8, 1992
- 99 . ----- Boletim Informativo - Flotanol D14, Hoechst do Brasil, p.1
- 100 . ----- Boletim Informativo - Flotinox S72, Hoechst do Brasil, p.1
- 101 . ----- Controle de Reagentes da Arafertil, p.2-8, 1991 (Relatório Interno)
- 102 . NEVES, I.D.; ASSIS, S.M.; PERES, A.E.C. Aspectos da Interação Amido/Ácidos Graxos na Formação de Espumas Aquosas e Mineralizadas, Flotação, Fundamentos, Prática e Meio Ambiente, Anais do III Encontro do Hemisfério Sul sobre Tecnologia Mineral e XV Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Hidrometalurgia, São Lourenço, MG, Brasil, Publicações ABTM, p.106-108, 1992
- 103 . GUIMARÃES, R.C. Preparação do Coletor de Barita, p.1-8, 1992 (Relatório Interno da Arafertil)
- 104 . GUIMARÃES, R.C.; CARDOSO, D. Ensaio Cinéticos de Condicionamento de Barita, p.1-3, 1993 (Relatório Interno da Arafertil)
- 105 . RIBEIRO, W.L. Metodologia de Caracterização Mineralógica de Minério da Arafertil via Teores Químicos, Arafertil, p.2-5, 1992 (Relatório Interno)
- 106 . GUIMARÃES, R.C. Dimensionamento das Colunas de Flotação do Circuito de Grossos, Arafertil, p.1-60, junho de 1993
- 107 . RICE, R.G.; OLIVER, A.D.; NEWMAN, J.P.; WILES, R.J. Reduced Dispersion Using Baffles in Column Flotation, Powder Technology 10, Lausanne, Netherlands, p.201-208, March 1974
- 108 . TAKATA, L.A.; GUIMARÃES, R.C. Células de Coluna para Flotação de Barita e Apatita da Fração Grossa do Minério, Arafertil, p.1-14, maio de 1993 (Relatório Interno)

- 109 . TURKEY, J.P.; FRANZIDIS, P.; O'CONNOR, C.T. The Effects of Physical and Chemical Parameters on Bubble Size Distributions in a Cominco Air Sparging Test Rig, International Conference on Column Flotation, Sudbury, Canada, p.294-301, 1991
- 110 . ----- Desenhos de Projeto 311-02-400-(1535-1562-1536-056-1556-1584-1560-0140), Arafertil, outubro de 1993 (Documentos Internos)
- 111 . ----- Sparger Manual For The Cominco Air Sparging System, Cominco Engineering Services Ltd., Vancouver, Canadá, p.3-10, 1993
- 112 . BROMLEY, E.H.; EGAN, J.R.; SHARP, G.R. Column Flotation at Cominco, International Conference on Column Flotation, Sudbury, Canada, p.588-590, 1991
- 113 . ----- Solicitação de Crédito SC-516, Arafertil, p.1-2, 1993 (Documento Interno)
- 114 . GOULART, J.R.B. Acompanhamento de Solicitações de Crédito, Arafertil, p.2-27, 1994 (Relatório Interno)
- 115 . ABREU, P.F.S.P.; STEPHAN, C. Análise de Investimentos, Editora Campus Ltda., Rio de Janeiro, p.38-43,58-76, 1982
- 116 . GALHARDO, G.P. Engenharia Econômica, IDORT - São Paulo, p.41-45, 1986
- 117 . ----- Manual de Referência - Lotus 1-2-3, manual do "software" Lotus 1-2-3, p.264-272, 1988
- 118 . ----- Column Cell Operating Manual - Arafertil S.A., Cominco Engineering Services Ltd. - Column Cell Technology Division, Vancouver, Canadá, p.3-27,31-40, 1993
- 119 . ----- Controle Operacional, Planilhas Diárias da Usina de Beneficiamento, Arafertil, 1994 (Relatório Interno)

TABELA I.3 - RESULTADOS METALÚRGICOS

ENSAIO	TEORES (%)			RECUPERAÇÃO (%)		
	BaSO ₄	P ₂ O ₅	CaO	RM	BARITA	APATITA
	ALIM.					
	FLOT.					
	N. FLOT.					
	ALIM.					
	FLOT.					
	N. FLOT.					
	ALIM.					
	FLOT.					
	N. FLOT.					
	ALIM.					
	FLOT.					
	N. FLOT.					
	ALIM.					
	FLOT.					
	N. FLOT.					
	ALIM.					
	FLOT.					
	N. FLOT.					
	ALIM.					
	FLOT.					
	N. FLOT.					
	ALIM.					
	FLOT.					
	N. FLOT.					
	ALIM.					
	FLOT.					
	N. FLOT.					

**APÊNDICE II - ENSAIOS DE CONDICIONAMENTO REALIZADOS EM
ESCALA BANCADA**

**TABELA II.1 - INFLUÊNCIA DO TEMPO DE CONDICIONAMENTO DE
ESPUMANTE E COLETOR NA FLOTAÇÃO DE BARITA**

ENSAIO	TEMPO DE COND. (mim)		FLOTADO (%)			N. FLOT. BaSO ₄	RECUPERAÇÃO (%)		
	ESPUM.	COLETOR	BaSO ₄	P ₂ O ₅	CaO		MASSA	BARITA	APATITA
1	0	0	60,8	9,1	10,6	0,7	14,1	95,0	5,6
2	5	5	72,0	9,2	10,8	0,5	11,9	95,0	4,8
3	10	10	75,9	2,3	2,9	3,1	8,2	68,7	0,9
4	15	15	83,7	2,0	2,5	6,3	3,5	32,7	0,3

NOTAS:

1 - CONDIÇÕES OPERACIONAIS

Massa de sólidos (g)	1000
Condicionamento	
sólidos (%)	50
pH	9,5
espumante	Flotanol D14
dosagem (g/t)	30 g/t
coletor	Flotisor S72
dosagem (g/t)	300 g/t
Flotação	
equipamento	célula Wemco (bancada)
sólidos (%)	20%
pH	9,5
tempo	exaustão (2 mim)

TABELA II.2 - INFLUÊNCIA DO TEMPO DE CONDICIONAMENTO DE COLETOR NA FLOTAÇÃO DE BARITA

ENSAIO	TEMPO DE COND. (min)	FLOTADO (%)	FLOTADO (%)			N. FLOT. BaSO ₄	RECUPERAÇÃO (%)		
			BaSO ₄	P ₂ O ₅	CaO		MASSA	BARITA	APATITA
5	0	0	72,8	4,6	5,1	1,4	10,7	86,0	2,1
6	0	5	72,3	3,8	4,7	1,3	10,9	87,0	2,0
7	0	10	72,1	2,9	4,3	1,4	10,8	86,0	1,8
8	0	15	72,6	2,1	2,7	2,6	9,0	72,1	0,9
9	0	20	71,5	1,8	2,4	4,2	7,2	56,8	0,6

NOTAS:

1 - CONDIÇÕES OPERACIONAIS

Massa de sólidos (g)	1000
Condicionamento	
sólidos (%)	50
pH	9,5
espumante	Flotanol D14
dosagem (g/t)	30 g/t
coletor	Flotisor S72
dosagem (g/t)	300 g/t
Flotação	
equipamento	célula Wemco (bancada)
sólidos (%)	20%
pH	9,5
tempo	exaustão (2 min)

**APÊNDICE III - ENSAIOS REALIZADOS NA UNIDADE PILOTO DE
FLOTAÇÃO EM COLUNA**

**TABELA III.1 - EFEITO DO TEMPO DE CONDICIONAMENTO DE
REAGENTES**

ENSAIO	ESPUMANTE LOCAL	TEMPO (mim)	COLETOR LOCAL	TEMPO (mim)	FLOTADO (%)			N. FLOT. BaSO ₄	RECUPERAÇÃO (%)		
					BaSO ₄	P ₂ O ₅	CaO		MASSA	BARITA	APATITA
1	CN	10,4	CN	10,4	82,7	2,1	2,6	3,5	8,2	67,9	0,8
2	BM2	5,2	CN	10,4	85,2	1,8	2,2	1,4	10,3	87,4	0,9
3	COL.	0	CN	10,4	76,2	3,7	4,6	2,0	10,8	82,2	1,9
4	BM2	5,2	BM2	5,2	85,4	1,7	2,1	1,2	10,5	89,3	0,8
5	BM2	5,2	COL.	0	86,3	1,6	2,0	1,8	9,7	83,7	0,7

NOTAS:

1 - Ensaio realizado na unidade piloto de flotação em coluna na pilha 2592

2 - CONDIÇÕES OPERACIONAIS

Massa de sólidos (kg/h)	3670
Condicionamento	
sólidos (%)	48,9
pH	9,5
espumante	Flotanol D14
dosagem (g/t)	39
coletor	Flotisor S72
dosagem (g/t)	137
Flotação	
sólidos (%)	
alimentação	48,9
flotado	42
não flotado	39,2
aerador	
veloc. do ar (cm/s)	1,2
pressão (kgf/cm ²)	4,5
veloc. água de chuveiro (cm/s)	0,16
camada de espuma (cm)	30

TABELA III.2 - INFLUÊNCIA DA DOSAGEM DE COLETOR NA FLOTAÇÃO DE BARITA

ENSAIO	COLETOR (g/t)	FLOTADO (%)			N. FLOT. BaSO ₄	RECUPERAÇÃO (%)		APATITA
		BaSO ₄	P ₂ O ₅	CaO		MASSA	BARITA	
6	303	82,7	3,0	4,0	0,4	12,8	96,8	2,1
7	109	86,7	2,2	2,9	1,1	11,4	91,1	1,3
8	52	87,2	2,1	2,9	2,0	10,4	83,6	0,8
9	35	88,2	1,9	2,6	3,2	9,1	73,3	0,9

NOTAS:

1 - Ensaios realizados na unidade piloto de flotação em coluna na pilha 2593

2 - Condições Operacionais

Alimentação		3470
Condicionamento		
sólidos (%)		48,4
pH		9,5
espumante	Flotanol D14	
dosagem (g/t)		37
coletor	Flotisor S72	
dosagem (g/t)		-
Flotação		
sólidos (%)		
	alimentação	48,4
	flotado	40,7
	não flotado	38,7
aerador		
	veloc. do ar (cm/s)	1,2
	pressão (kgf/cm ²)	4,5
	veloc. água de chuveiro (cm/s)	0,16
	camada de espuma (cm)	40

**TABELA III.3 - INFLUÊNCIA DA DOSAGEM DE ESPUMANTE E COLETOR
NA FLOTAÇÃO DE BARITA**

ENSAIO	DOSAGEM (g/t)		REL. E:C	FLOTADO (%)			N. FLOT. BaSO ₄	RECUPERAÇÃO (%)		
	ESPUM.	COLETOR		BaSO ₄	P ₂ O ₅	CaO		MASSA	BARITA	APATITA
10	71	230	0,31 : 1	78,7	3,9	4,8	0,9	13,9	93,3	2,7
11	33	110	0,30 : 1	83,8	2,9	3,7	1,5	12,4	88,8	1,8
12	17	53	0,32 : 1	93,9	0,7	0,8	6,7	5,7	46,0	0,2

NOTAS:

1 - Ensaios realizados na unidade piloto de flotação em coluna na pilha 2585

2 - Condições Operacionais

Alimentação		3720
Condicionamento		
sólidos (%)		49,5
pH		9,5
espumante		Flotanoi D14
dosagem (g/t)		-
coletor		Flotinor S72
dosagem (g/t)		-
Flotação		
sólidos (%)		
	alimentação	49,5
	flotado	43,7
	não flotado	39,8
aerador		
	veloc. do ar (cm/s)	1,2
	pressão (kgf/cm ²)	4,5
	veloc. água de chuveiro (cm/s)	0,16
	camada de espuma (cm)	30

TABELA III.4 - INFLUÊNCIA DA DOSAGEM DE ESPUMANTE NA FLOTAÇÃO DE BARITA

ENSAIO	ESPUM. (g/t)	FLOTADO (%)			N. FLOT. BaSO ₄	RECUPERAÇÃO (%)		
		BaSO ₄	P ₂ O ₅	CaO		MASSA	BARITA	APATITA
13	16	87,6	2,1	2,7	4,5	7,8	62,3	0,8
14	35	86,1	2,3	2,8	1,2	11,5	90,4	1,2
15	72	86,4	2,4	2,9	1,1	11,6	91,5	1,3
16	120	82,3	3,7	4,9	1,5	12,4	88,6	2,3

NOTAS:

1 - Ensaios realizados na unidade piloto de flotação em coluna na pilha 2586

2 - Condições Operacionais

Alimentação		3300
Condicionamento		
	sólidos (%)	49,2
	pH	9,5
	espumante	Flotanol D14
	dosagem (g/t)	-
	coletor	Flotisor S72
	dosagem (g/t)	120
Flotação		
	sólidos (%)	
		alimentação
		49,2
		flotado
		43,1
		não flotado
		38,5
	aerador	
		veloc. do ar (cm/s)
		1,2
		pressão (kgf/cm ²)
		4,5
	veloc. água de chuveiro (cm/s)	0,16
	camada de espuma (cm)	40

TABELA III.5 - INFLUÊNCIA DO pH DE CONDICIONAMENTO NA FLOTAÇÃO DE BARITA

ENSAIO	pH	FLOTADO (%)			N. FLOT. BaSO ₄	RECUPERAÇÃO (%)		APATITA
		BaSO ₄	P ₂ O ₅	CaO		MASSA	BARITA	
13	16	87,6	2,1	2,7	4,5	7,8	62,3	0,8
14	35	86,1	2,3	2,8	1,2	11,5	90,4	1,2
15	72	86,4	2,4	2,9	1,1	11,6	91,5	1,3
16	120	82,3	3,7	4,9	1,5	12,4	88,6	2,3

NOTAS:

1 - Ensaios realizados na unidade piloto de flotação em coluna na pilha 2586

2 - Condições Operacionais

Alimentação		3300
Condicionamento		
sólidos (%)		49,2
pH		9,5
espumante		Flotanol D14
dosagem (g/t)		37
coletor		Flotisor S72
dosagem (g/t)		120
Flotação		
sólidos (%)		
	alimentação	49,2
	flotado	43,1
	não flotado	38,5
aerador		
	veloc. do ar (cm/s)	1,2
	pressão (kgf/cm ²)	4,5
veloc. água de chuva (cm/s)		0,16
camada de espuma (cm)		40

TABELA III.6 - INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DO AR NA FLOTAÇÃO DE BARITA

ENSAIO	VELOC. AR (cm/s)	FLOTADO (%)			N. FLOT. BaSO ₄	RECUPERAÇÃO (%)		
		BaSO ₄	P ₂ O ₅	CaO		MASSA	BARITA	APATITA
22	0,6	88,3	2,0	2,3	1,2	10,8	80,8	1,0
23	0,9	87,6	1,8	2,1	1,4	10,5	88,8	1,0
24	1,2	87,1	1,9	2,2	1,5	10,4	88,9	1,1
25	1,5	87,7	1,9	2,3	2,4	9,3	79,1	0,8
26	1,8	86,9	2,0	2,4	3,6	8,6	69,5	0,7

NOTAS:

1 - Ensaio realizado na unidade piloto de flotação em coluna na pilha 2596

2 - Condições Operacionais

Alimentação (kg/h)	3520
Condicionamento	
sólidos (%)	48,9
pH	9,5
espumante	Flotanol D14
dosagem (g/t)	34
coletor	Flotisor S72
dosagem (g/t)	109
Flotação	
sólidos (%)	
alimentação	48,9
flotado	40,2
não flotado	38,6
aerador	
veloc. do ar (cm/s)	-
pressão (kgf/cm ²)	4,5
veloc. água de chuveiro (cm/s)	0,16
camada de espuma (cm)	40

**TABELA III.7 - INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DA ÁGUA DE CHUVEIRO
NA FLOTAÇÃO DE BARITA**

ENSAIO	VELOC. ÁGUA (cm/s)	FLOTADO (%)			N. FLOT. BaSO ₄	RECUPERAÇÃO (%)		
		BaSO ₄	P ₂ O ₅	CaO		MASSA	BARITA	APATITA
27	0	83,5	2,7	3,3	1,4	11,0	88,1	1,4
28	0,08	84,1	2,4	3,0	1,4	10,9	88,1	1,3
29	0,16	86,5	2,0	2,5	1,1	10,9	90,6	1,0
30	0,23	85,2	2,3	2,9	1,2	11,0	89,8	1,2
31	0,31	84,7	2,6	3,2	1,6	10,6	86,3	1,3

NOTAS:

1 - Ensaios realizados na unidade piloto de flotação em coluna na pilha 2596

2 - Condições Operacionais

Alimentação (kg/h)	3520
Condicionamento	
sólidos (%)	48,9
pH	9,5
espumante	Flotanol D14
dosagem (g/t)	34
coletor	Flotisor S72
dosagem (g/t)	109
Flotação	
sólidos (%)	
alimentação	48,9
flotado	37-42
não flotado	34-40
aerador	
veloc. do ar (cm/s)	1,2
pressão (kgf/cm ²)	4,5
veloc. água de chuva (cm/s)	-
camada de espuma (cm)	40

TABELA III.8 - INFLUÊNCIA DA ALTURA DA CAMADA DE ESPUMA NA FLOTAÇÃO DE BARITA

ENSAIO	CAM. ESPUMA (cm)	FLOTADO (%)			N. FLOT. BaSO ₄	RECUPERAÇÃO (%)		
		BaSO ₄	P ₂ O ₅	CaO		MASSA	BARITA	APATITA
32	20	84,8	2,3	2,8	1,8	11,7	86,2	1,2
33	40	86,0	2,3	2,7	1,9	11,4	85,4	1,2
34	60	86,9	1,8	2,2	3,8	9,3	70,0	0,8
35	80	86,8	1,8	2,2	5,7	7,2	53,9	0,6
36	100	87,1	1,7	2,1	9,6	2,2	16,6	0,2

NOTAS:

1 - Ensaios realizados na unidade piloto de flotação em coluna na pilha 2597

2 - Condições Operacionais

Alimentação (kg/h)	3700
Condicionamento	
sólidos (%)	49,3
pH	9,5
espumante	Flotanol D14
dosagem (g/t)	33
coletor	Flotisor S72
dosagem (g/t)	117
Flotação	
sólidos (%)	
alimentação	49,3
flotado	43
não flotado	37-39
aerador	
veloc. do ar (cm/s)	1,2
pressão (kgf/cm ²)	4,5
veloc. água de chuveiro (cm/s)	0,16
camada de espuma (cm)	-

TABELA III.9 - INFLUÊNCIA DA PORCENTAGEM DE SÓLIDOS NA FLOTAÇÃO DE BARITA

ENSAIO	PORC. SÓL. (%)	FLOTADO (%)			N. FLOT. BaSO ₄	RECUPERAÇÃO (%)		
		BaSO ₄	P ₂ O ₅	CaO		MASSA	BARITA	APATITA
37	20	84,3	2,0	3,2	1,7	10,2	85,2	1,6
38	30	84,2	2,2	3,2	1,6	9,9	85,8	1,4
39	40	83,9	2,4	3,4	1,7	9,8	84,7	1,5
40	50	83,8	2,9	3,7	1,5	10,6	86,8	1,2

NOTAS:

1 - Ensaios realizados na unidade piloto de flotação em coluna na pilha 2598

2 - Condições Operacionais

Alimentação (kg/h)	3750
Condicionamento	
sólidos (%)	49,5
pH	9,5
espumante	Flotanol D14
dosagem (g/t)	35
coletor	Flotisor S72
dosagem (g/t)	128
Flotação	
sólidos (%)	
alimentação	-
flotado	35 -42
não flotado	33 -39
aerador	
veloc. do ar (cm/s)	1,2
pressão (kgf/cm ²)	4,5
veloc. água de chuveiro (cm/s)	0,16
camada de espuma (cm)	30

TABELA III.10 - INFLUÊNCIA DA TAXA DE ALIMENTAÇÃO DE SÓLIDOS NA FLOTAÇÃO DE BARITA

ENSAIO	ALIMENT. (t/h)	FLOTADO (%)			N. FLOT. BaSO4	RECUPERAÇÃO (%)		
		BaSO4	P2O5	CaO		MASSA	BARITA	APATITA
41	1,0	86,8	2,4	2,9	1,7	10,3	86,2	1,2
42	2,2	86,3	2,2	2,8	1,5	10,2	85,3	1,1
43	3,1	86,2	2,3	2,8	1,3	9,8	85,7	1,3
44	3,8	86,0	2,4	3,0	1,4	9,9	85,1	1,0

NOTAS:

1 - Ensaios realizados na unidade piloto de flotação em coluna na pilha 2561

2 - Condições Operacionais

Alimentação (kg/h)	-
Condicionamento	
sólidos (%)	49,2
pH	9,5
espumante	Flotanol D14
dosagem (g/t)	37
coletor	Flotisor S72
dosagem (g/t)	112
Flotação	
sólidos (%)	
alimentação	49,2
flotado	35 -42
não flotado	35 -39
aerador	
veloc. do ar (cm/s)	1,2
pressão (kgf/cm ²)	4,5
veloc. água de chuveiro (cm/s)	0,16
camada de espuma (cm)	30

**TABELA III.11 - INFLUÊNCIA DA ALTURA DA ZONA DE RECUPERAÇÃO
NA FLOTAÇÃO DE BARITA**

ENSAIO	ZONA REC. (cm)	FLOTADO (%)			N. FLOT. BaSO ₄	RECUPERAÇÃO (%)		
		BaSO ₄	P ₂ O ₅	CaO		MASSA	BARITA	APATITA
45	452	85,2	2,7	3,0	1,5	10,8	84,8	0,9
46	694	85,5	2,5	2,9	1,6	10,7	85,2	1,1
47	936	85,7	2,4	2,7	1,6	10,5	85,5	1,2

NOTAS:

1 - Ensaios realizados na unidade piloto de flotação em coluna na pilha 2563

2 - Condições Operacionais

Alimentação (kg/h)	3650
Condicionamento	
sólidos (%)	48,7
pH	9,5
espumante	Flotanol D14
dosagem (g/t)	42
coletor	Flotisor S72
dosagem (g/t)	118
Flotação	
sólidos (%)	
alimentação	48,7
flotado	38 - 42
não flotado	35 - 40
aerador	
veloc. do ar (cm/s)	1,2
pressão (kgf/cm ²)	4,5
veloc. água de chuveiro (cm/s)	0,16
camada de espuma (cm)	30

**APÊNDICE IV - CALIBRAÇÃO DA UNIDADE PILOTO DE FLOTAÇÃO EM
COLUNA**

DADOS DE ENTRADA				

. Vazao de solidos	NFS	kg/hora	3.800.00	
. Densidade do minerio (alimentacao)	RS	g/cm ³	3.40	
. Densidade do minerio (flotado)	RSF	g/cm ³	4.20	
. Percentagem de solidos (alimentacao)	PS	(%)	49.0	
. Percentagem de solidos (flotado)	PSF	(%)	24.7	
. Diametro de partícula (d ₈₀) (alim)	DP	mm	0.150	
. Diametro de partícula (d ₈₀) (flot)	DPF	mm	0.110	. Composicao quimica
. Composicao mineralogica (alim.)				
- Apatita	PA	(%)	45.19	- P2O5 19.15
- Barita	PB	(%)	10.97	- CaO 25.01
- Calcita	PC	(%)	1.61	- BaO 7.21
- Magnetita / goethita / ilmenita	PD	(%)	22.95	- SO3 3.76
- Mica e silicatos	PE	(%)	3.05	- Fe2O3 27.02
- Silica e outros	PF	(%)	16.23	- MgO 0.68
			100.00	- SiO2 16.23
. Constantes cineticas de flotacao				
- Apatita	KCA	min-1	0.00320	0.00320
- Barita	KCB	min-1	0.59002	0.59001
- Calcita	KCC	min-1	0.00000	0.00000
- Magnetita / goethita / ilmenita	KCD	min-1	0.01252	0.01252
- Mica e silicatos	KCE	min-1	0.00570	0.00570
- Silica e outros	KCF	min-1	0.00000	0.00000
. Diametro da coluna	D	m	0.610	MEDIA
. Altura da zona de coleta	H	m	8.79	0.59002 = kc (barita)
. Holdup do gas	EG	(%)	16.5	0.00505 = kc (gangaa)
. Veloc. Superf. Agua de Lavagem	JB	cm/s	0.210	
. Veloc. Superf. do gas	JG	cm/s	1.200	
. Recuperacao massica estimada (flot)	RME	(%)	11.96	
. Recuperacao na zona de limpeza				
- Apatita	RZLA	(%)	50.00	
- Barita	RZLB	(%)	50.00	
- Calcita	RZLC	(%)	50.00	
- Magnetita / goethita / ilmenita	RZLD	(%)	50.00	
- Mica e silicatos	RZLE	(%)	50.00	
- Silica e outros	RZLF	(%)	50.00	
. Recuperacao total (nao flotado)				
- Apatita	RANF	(%)	98.64	98.63
- Barita	RBNF	(%)	8.16	8.24
- Calcita	RCNF	(%)	100.00	100.00
- Magnetita/Goethita/Ilmenita	RDNF	(%)	94.76	93.55
- Mica e silicatos	RENF	(%)	97.59	97.02
- Silica e outros	RFNF	(%)	100.00	100.00
. Recuperacao de massa (nao flotado)	RMNF	(%)	88.03	88.5
. Massa de nao flotado	MNF	kg/hora	3.345.31	3.363.0
FRAÇÃO NÃO FLOTADA				
. Teor de Apatita	TANF	(%)	50.63	12.80
. Teor de Barita	TBNF	(%)	1.02	10.21
. Teor de Calcita	TCNF	(%)	1.83	5.69
. Teor de Magnetita/Goethita/Ilmenita	TDNF	(%)	24.70	25.53
. Teor de Mica e silicatos	TENF	(%)	3.38	6.18
. Teor de Silica e outros	TFNF	(%)	18.44	39.60

. Composicao quimica			
- P205 apat.	P	(%)	21.46
- CaO	Ca	(%)	28.02
- BaO	Ba	(%)	0.67
- Fe2O3	Fe	(%)	27.82
- MgO	Mg	(%)	0.75
- SiO2	Si	(%)	18.44
. Recuperacao			
			Prod. (kg/h)
- P205	P	(%)	98.64 717.86
- CaO	Ca	(%)	98.64 937.49
- BaO	Ba	(%)	8.16 22.36
- Fe2O3	Fe	(%)	90.63 930.62
- MgO	Mg	(%)	97.59 25.09
- SiO2	Si	(%)	100.00 616.74
. Capacidade de carregamento	CCA	g/cm2.min	2.59
. Capacidade de carregamento	CC	t/m2.hr	1.56
. Capacidade de carregamento	CCM	kg/m3 ar	36.01
. Lip Loading (em polpa) - real	LLR	g/cm/min	158.18
. Lip Loading (em polpa) - calculado	LLC	g/cm/min	764.54

TESTE DE CONSISTENCIA DE DADOS

. Recuperacoes: RME - RM = (0.002)

. Veloc. sediment.: USPA - USPB = 0.000

			CALCULO	Referencia experimental		
. Recuperacao na zona de coleta						
- Apatita	RAC	(%)	2.68			
- Barita	RBC	(%)	95.74			
- Calcita	RCC	(%)	0.00			
- Magnetita/Goethita/Ilmenita	RDC	(%)	9.96			
- Mica e silicatos	REC	(%)	4.71			
- Silica e outros	RFC	(%)	0.00			
. Recuperacao total (no flotado)						
- Apatita	RAT	(%)	1.36	1.37	1.34	0.0103
- Barita	RBT	(%)	91.84	91.76	91.71	(0.0757)
- Calcita	RCT	(%)	0.00	0	0.00	0.0000
- Magnetita/Goethita/Ilmenita	RDT	(%)	5.24	6.45	6.45	1.2079
- Mica e silicatos	RET	(%)	2.41	2.98	2.98	0.5675
- Silica e outros	RFT	(%)	0.00	0	0.00	0.0000
. Recuperacao de massa (flotado)	RM	(%)	11.97	11.50		(0.4655)
. Massa de flotado	MCF	kg/hora	454.69	437.00		(17.6883)
FRA'AO FLOTADA						
. Teor de Apatita	TA	(%)	5.14	85.00		
. Teor de Barita	TB	(%)	84.20	0.60		
. Teor de Calcita	TC	(%)	0.00	2.43		
. Teor de Magnetita/Goethita/Ilmenita	TD	(%)	10.05	4.28		
. Teor de Mica e silicatos	TE	(%)	0.61	0.36		
. Teor de Silica e outros	TF	(%)	0.00	7.33		100

Composicao quimica					
- P2O5 apat.	P	(%)	2.18	36.35	
- CaO	Ca	(%)	2.84	46.51	
- BaO	Ba	(%)	55.31	0.88	
- Fe2O3	Fe	(%)	14.43	5.78	
- MgO	Mg	(%)	0.14	0.08	
- SiO2	Si	(%)	0.00	0.58	
Recuperacao				Prod. (kg/h)	
- P2O5	P	(%)	1.36	9.90	
- CaO	Ca	(%)	1.36	12.92	
- SO3	Ba	(%)	91.84	251.48	
- Fe2O3	Fe	(%)	6.39	65.62	
- MgO	Mg	(%)	2.41	0.62	
- SiO2	Si	(%)	0.00	0.00	

VALORES CALCULADOS

. Area da secao transversal	AC	m2	0.2922			
. Relacao Altura:Diametro	H:D		14.41			
. Volume da zona de coleta	VC	m3	2.5688			
. Densidade da polpa (aliment.)	RSL	g/cm3	1.5288			
. Densidade da polpa (flotado)	RSLF	g/cm3	1.2318			
. Vazao volumetrica de polpa (alim.)	QF	lt/min	84.55			
. Vazao volumetrica de polpa (flotado)	QFF	lt/min	24.90			
. Fracao solido na Alimentacao (vol.)	ES	frac.	0.2203			
. Fracao solido no flotado (vol.)	ESF	frac.	0.0724			
. Vazao volumetrica de solido (alim.)	QSA	lt/min	18.6278			
. Vazao volumetrica de solido (flot.)	QSAF	lt/min	1.8041			
. Vazao volumetrica de solido (alim.)	QSB	cm3/s	310.46			
. Vazao volumetrica de solido (flot.)	QSBF	cm3/s	30.07			
. Vazao volumetrica de agua (aliment.)	QWA	lt/min	65.92			
. Vazao volumetrica de agua (flotado)	QWAF	lt/min	23.10			
. Vazao volumetrica de agua (aliment.)	QWB	cm3/s	1.098.66			
. Vazao volumetrica de agua (flotado)	QWBF	cm3/s	384.99			
. Veloc. Superf. polpa flotada	JC	cm/s	0.142			
. Veloc. Superf. agua no flotado	JCW	cm/s	0.132			
. Deslocamento de agua de lavagem	DV	--	1.594	(1.2(DV(1.5)		
. Veloc. Superf. efetiva (BIAS)	JBR	cm/s	0.12			
. Veloc. Superf. da polpa	JSL	cm/s	0.5942			
. Veloc. sedimentacao das particulas	USPA	cm/s	1.0038		1.0038	USPBC
. Veloc. sedimentacao das particulas	USPB	cm/s	1.0038			
. Numero de Reynolds	REP	-	1.1739			
. Recuperacao massica calculada (flot)	RMC	(%)	11.96			
. Velocidade intersticial	VI	cm/s	0.71			
. Tempo de residencia do liquido	TW	min	20.5863			
. Tempo de residencia das particulas	TP	min	8.54			
. Fator ND	ND	-	0.23			
. Fator a - Apatita	AA	-	1.0127	34.382	35.330	0.000
. Fator a - Barita	AB	-	2.3900	81.145	1.906.658	0.012
. Fator a - Calcita	ACA	-	1.0000	33.951	33.951	0.000
. Fator a - Magnetita/Goethita/Ilmenita	AD	-	1.0488	35.608	39.548	0.000
. Fator a - Mica e silicatos	AE	-	1.0225	34.715	36.432	0.000
. Fator a - Silica e outros	AF	-	1.0000	33.951	33.951	0.000
	B	l/min	36.82			
	G	l/min	210.42			

APÊNDICE V - SIMULAÇÕES PARA DIMENSIONAMENTO DA UNIDADE INDUSTRIAL PARA FLOTAÇÃO DE BARITA EM COLUNA

Discriminação	VARIABLES DE ENTRADA			SIMULAÇÃO			
	Símbolo	Unidade	Valor				
Vazão de sólidos requerida	Mfs	Ton/hora	250 *	Mfs	250	t/h	
Densidade do sólido				Altura	12	m	
. de alimentação	Rs	g/cm ³	3.4 *	NB	6		
. no flotado	Rsf	g/cm ³	4.2 *	Area trans.	13.5	m ²	
Porcentagem de sólidos							
. polpa de alimentação	PSA		49 *				
. flotado	PSF		24.7 *				
. rejeito	PSR		37 *				
Composição mineralógica							
Mineral (BARITA)	APA		12 *				
Mineral (GANGA)	GAN		88				
Constante cinética da flotação							
Mineral A	kcA	min ⁻¹	0.59002 *				
Mineral B	kcB	min ⁻¹	0.00505 *				
Recuperação Total de massa ESTIMADA	RTM	(%)	11.5 *				
Avaliação preliminar do diâmetro:							
Lip Loading experimental	LLE	g/cm.min	154				
Capacidade de carregamento experimental	CCAE	g/cm ² .min	2.5 *				
Secção transversal da coluna industrial	CAI	m ²	13.50				
Diâmetro preliminar (calculado)	DOP	m	4.15				
Diâmetro preliminar (aproximado)	DCE	m	4.00				
Perímetro interno (calculado)	PERT	cm	1.256.6				
Vazão de polpa no flotado	VZPF	g/min	1.939.946				
"Lip loading" de polpa (calculado)	PERI	g/cm.min	1.544				
"Lip loading" de polpa (teórico)	LIPL	g/cm.min	1.422				
Numero de "unidade-base" (proposto)	NB		6 *				
Diâmetro de Coluna base (referencia)	dc	metros	1.69				
Diâmetro de Coluna base (proposto)	dc	metros	1.69 *				
Altura de coluna-base	Hc	metros	12.00 *				
Velocidade superficial d'água de lavagem	JW	cm/seg	0.23 *				
Holdup do gás	Eg	(%)	16.5 *				
Velocidade superficial do gás	Jg	cm/seg	1.20 *				
Velocidade das partículas ESTIMADA	Usp(e)	cm/seg	1.0038 *				
Diâmetro das partículas da alim.	dp	cm	0.015 *				
Viscosidade do líquido	MI	poise	0.01 *				
Densidade do líquido	RI	g/cm ³	1.00 *				
Diâmetro das partículas do conc.	dpc	cm	0.011				
REQUISITOS OPERACIONAIS DA COLUNA							
Recuperação mínima do Mineral A	RMAP	(%)	88 *				
Teor mínimo do Mineral A no concentrado	THAP	(%)	88 *				

VARIÁVEIS DEDUZIDAS E CALCULADAS

Discriminacao	Simbolo	Unidade	Valor		
Area da secao transversal da coluna	Ac	cm ²	134.591		
Densidade da polpa (alimentacao)	DPA	g/cm ³	1.529		
Densidade da polpa (flotada)	DPF	g/cm ³	1.232		
Vazao volumetrica de polpa (alim.)	Qf	Litros/min	5.562.22		
Fracao volumetrica do solido (alim.)	Es	fracional	0.220		
Vazao volumetrica do solido (alim.)	QFS	Litros/min	1.225.49		
Vazao volumetrica do solido (alim.)	QFSA	cm ³ /seg	20.425		
Vazao volumetrica de agua (alim.)	QFW	Litros/min	4.336.73		
Vazao volumetrica de agua (alim.)	QFWA	cm ³ /seg	72.279		
Vazao volumetrica de polpa (flotado)	QFF	Litros/min	1.574.87		
Fracao volumetrica do solido (flotado)	ESF	fracional	0.072		
Vazao volumetrica do solido (flotado)	QFL	Litros/min	114.09		
Vazao volumetrica do solido (flotado)	QFLA	cm ³ /seg	1.901		
Vazao volumetrica de agua (flotado)	QWF	Litros/min	1.460.78		
Vazao volumetrica de agua (flotado)	QWFA	cm ³ /seg	24.346		
Velocidade superficial de polpa flotada	JC	cm/seg	0.195		
Velocidade superficial de agua no flotado	JCW	cm/seg	0.181		
Deslocamento de agua de lavagem	DV		1.271		
Veloc. Superf. efetiva (BIAS)	JBR	cm/seg	0.062		
Velocidade superficial de polpa	Jsl	cm/seg	0.734		
Tempo de residencia	t1	min	22.76		
Velocidade das particulas ESTIMADA	Usp(e)	cm/seg	1.0038	USPA	DIFA
Velocidade terminal das particulas	Usp	cm/seg	1.0038	1.0038	0
Numero de Reynolds das particulas	Rep		1.1739		
Tempo de residencia das particulas	tp	min	10.62		
Fator	Nd		0.432		
Fator	aA		3.441		
Fator	aB		1.045	(A)	(B)
				43.753	13.292
Recuperacao na zona de coleta				*****	14.015
* Mineral A	RcA	(%)	95.85%	0.111	0.001
* Mineral B	RcB	(%)	5.15%		

Recuperacao total de massas

Rf(est) (%)	RfcA (%)	RfcB (%)	Rtot (%)	Concentracao		
				Mineral A	Mineral B	Teor de P205
20	82.21%	1.08%	10.81%	91.25%	8.75%	38.5%
35	89.00%	1.87%	12.32%	86.67%	13.33%	36.6%
40	90.24%	2.13%	12.70%	85.26%	14.74%	36.0%
50	92.03%	2.64%	13.37%	82.59%	17.41%	34.9%
55	92.71%	2.90%	13.68%	81.33%	18.67%	34.3%
70	94.18%	3.66%	14.53%	77.80%	22.20%	32.8%

 COMPARAÇÃO ENTRE VALORES DE RECUPERAÇÃO DE MASSA NO FLOTADO:

RECUPERAÇÃO ESTIMADA	11.50%		
RECUPERAÇÃO CALCULADA	10.81%	A	14.53%
RECUPERAÇÃO CALCULADA (MÉDIA)	12.67%		

COMPARAÇÃO ENTRE VALORES DE CONCENTRAÇÃO DE APATITA NO FLOTADO:

CONCENTRAÇÃO REQUERIDA	88.00%		
CONCENTRAÇÃO CALCULADA	91.25%	A	77.80%
CONCENTRAÇÃO CALCULADA (MÉDIA)	84.53%		

COMPARAÇÃO ENTRE VALORES DE RECUPERAÇÃO DE APATITA NO FLOTADO:

RECUPERAÇÃO REQUERIDA	88.00%		
RECUPERAÇÃO CALCULADA	82.21%	A	94.18%
RECUPERAÇÃO CALCULADA (MÉDIA)	88.19%		

Verificar se os resultados de RECUPERAÇÃO e CONCENTRAÇÃO estão dentro dos requisitos operacionais da coluna

* Caso positivo: não há alterações a fazer

* Caso negativo: alterar valores de n (número base), d_c , H_c

 DIMENSIONAMENTO DE COLUNA

$$D_c(\text{projeto}) = d_c(\text{base}) \times \sqrt[n]{n}$$

$$D_c(\text{Projeto}) = 4.140 \text{ metros}$$

$$\text{Área} = 13.459 \text{ m}^2$$

$$\text{Dimensões retangulares: } 3.00 \times 4.50$$

$$\text{Área total} = 13.500 \text{ m}^2$$

$$\text{Área / unidade-base} = 2.25 \text{ m}^2$$

$$\text{Dimensões / unidade-base } 1.50 \times 1.50$$

CAPACIDADE DE CARREGAMENTO

	TEÓRICA	EXPERIMENTAL	CALCULADA
$C_a =$	9.20 Ton/m ² /h	1.50 Ton/m ² /h	2.13 Ton/m ² /h
$C_a =$	15.33 g/cm ² /min	2.50 g/cm ² /min	3.55 g/cm ² /min

 LIP LOADING

	TEORICO	EXPERIMENTAL	CALCULADA
LL =	9.63 Ton/m/h	0.92 Ton/m/h	3.23 Ton/m/h
LL =	1439 g/cm/min	154 g/cm/min	539 g/cm/min

VAZAO DE AR DO COMPRESSOR

CNTP	583 Nm ³ /	343 Ncfm
P = 1 atm	626 m ³ /h	368 cfm
T = 20 C		

TEMPO DE RESIDENCIA (min)

SOLIDO	LIQUIDO	REJEITO
10.6	22.8	18.4
