

DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS DA TERRA  
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

**PROCESSAMENTO POR FLUTUAÇÃO DO  
CAULINO DE OLHO MARINHO**

**Contribuição para o estudo do fenómeno de arrastamento em  
flutuação de polpas com partículas de calibre muito fino**

por

**Fernando Antunes Gaspar Pita**

Dissertação para obtenção do  
grau de Doutor em  
Engenharia de Minas na  
especialidade de mineração

**Coimbra  
2000**

## RESUMO

A flutuação é um processo de concentração de minerais que se baseia nas propriedades superficiais das partículas, tendo por base a adesão selectiva de algumas partículas sólidas para com o ar e de outras para com a água. Apesar dela depender de muitas variáveis, o calibre das partículas tem uma importância fundamental. Este processo apresenta um campo de aplicação que varia desde algumas  $\mu\text{m}$  até algumas centenas de  $\mu\text{m}$ . As granulometrias finas levantam alguns problemas relativamente à recuperação e à selectividade do processo de separação.

Para o sucesso de uma operação de flutuação não basta que as partículas hidrófobas flutuem desde a zona da polpa até à espuma e sejam aí recolhidas, é também necessário que a intensidade de arrastamento seja diminuta. Sobretudo para partículas finas, para as quais se torna difícil promover a flutuação, o arrastamento desempenha uma importância significativa na flutuação deste tipo de material, constituindo um problema, pois nele não há discriminação entre as partículas hidrófobas e hidrófilas, não contribuindo portanto para a separação daquele tipo de partículas.

No presente trabalho pretendemos analisar o processo de flutuação de um material com elevada quantidade de finos, permitindo assim avaliar a influência do calibre das partículas neste processo de separação, nomeadamente na flutuação verdadeira e no arrastamento.

Para além do calibre das partículas, são muitas as variáveis que influenciam o processo de flutuação, designadamente as relacionadas com a alimentação e com as condições operatórias. No presente trabalho analisamos algumas delas, não apenas a concentração e tipo de reagentes mas também o tipo de aparelho (célula vs coluna), grau de agitação na célula, taxa de aeração na coluna e altura da espuma na coluna. A partir da variação daquelas condições de trabalho, analisamos a influência do calibre das partículas e estudamos a selectividade do processo de flutuação de um material com elevada quantidade de finos através da quantificação da contribuição da flutuação verdadeira e da flutuação por arrastamento.

Para as diferentes condições analisamos o comportamento das partículas flutuadas e arrastadas na zona da espuma e a influência do calibre das partículas nos fenómenos de arrastamento e de drenagem, que nos permite concluir do efeito do calibre.

Implementamos um novo método de cálculo da contribuição da flutuação verdadeira e da flutuação por arrastamento, também designada por flutuação falsa. Os resultados obtidos por este novo método, designado por método Pita (nº4), são comparados com os resultados obtidos pelos três métodos já conhecidos (método de Trahar, método de Warren e método de V.Ross).

A partir dos dados da composição mineralógica do caulino, determinados por microsonda, que permitiram concluir que os principais minerais contaminantes do caulino da fracção fina são o quartzo, óxidos de ferro, ilmenite e rútilo, implementamos um modelo fenomenológico que, perante determinadas condições de flutuação, avalia o grau de flutuabilidade daqueles minerais penalizantes, tendo em consideração a influência do calibre das partículas na flutuação e no arrastamento.

Para o estudo do processo de flutuação de um material com elevada quantidade de finos, escolhemos o caulino como produto de trabalho, pois ele apresenta uma granulometria extremamente fina. Para este efeito utilizamos o caulino de Olho Marinho (Lousã), presentemente aplicado na indústria cerâmica, visando a flutuação dos minerais hidrófobos penalizantes. Após a realização de ensaios de flutuação foi possível concluir que condições operatórias conduzem aos melhores resultados.

Para levar a cabo o presente estudo são efectuadas análises químicas do flutuado e do afundado de modo a determinar os seus teores em óxido de ferro, de titânio e de manganês, constituintes dos principais minerais penalizantes. Aqueles teores servem de aferidores da qualidade da flutuação e, conjuntamente com as respectivas recuperações, constituem os dados a utilizar no presente trabalho, permitindo analisar a influência das diferentes condições envolvidas no processo de flutuação.

O caulino é uma argila especial constituída fundamentalmente pelo seu mineral principal, caulinite e/ou pela halosite, ocorrendo associado a outros minerais penalizantes, como sejam o quartzo, micas, feldspatos e várias formas de óxidos de ferro e titânio. Estas impurezas, que reduzem o valor do caulino, condicionam a cor do produto final e aumentam a abrasividade da polpa, terão de ser eliminadas por processos de beneficiação, de modo a obter-se um caulino lavado comerciável. Enquanto numa primeira fase da beneficiação, por processos de classificação por equivalência, são eliminados os minerais penalizantes com maior calibre, por vezes, para possibilitar a aplicação de um caulino numa indústria mais exigente, é necessário recorrer a operações de apuramento, nomeadamente ao processo de flutuação por espumas, para eliminar os minerais penalizantes de pequeno calibre.

## ÍNDICE

<b>Resumo</b> .....	iii
<b>Abstract</b> .....	v
<b>Agradecimentos</b> .....	vii
<b>Índice</b> .....	ix
<b>Índice de tabelas</b> .....	xv
<b>Índice de figuras</b> .....	xxi
<b>1 - INTRODUÇÃO. OBJECTIVOS</b> .....	1
1.1. Introdução .....	1
1.2. Objectivos .....	4
<b>2 - CARACTERÍSTICAS GERAIS DO CAULINO</b> .....	5
2.1. Definição de caulino .....	5
2.2. Génese e ocorrência .....	6
2.3. Aplicações do caulino .....	8
2.4. Caracterização e identificação dos minerais de caulino. O caulino de Olho Marinho .....	11
2.5. O caulino em Portugal (produção, exportação e importação) .....	22
2.6. Produção mundial de caulino .....	25
<b>3 - BENEFICIAÇÃO DE MINÉRIO CAULÍNÍFICO</b> .....	27
3.1. Introdução .....	27
3.2. Classificação por equivalência .....	28
3.3. Apuramento. Eliminação de impurezas ultrafinas .....	29
3.3.1. Impurezas abrasivas .....	29
3.3.2. Impurezas colorantes .....	30
3.3.3. Impurezas argilosas .....	31
3.3.4. Matéria orgânica .....	32
3.4. Tratamento industrial do minério caulínífico de Olho Marinho .....	32
<b>4 - PRINCÍPIOS GERAIS DA FLUTUAÇÃO</b> .....	35
4.1. Introdução. Definição .....	35
4.2. Flutuação verdadeira e flutuação falsa (arrastamento) .....	37
4.3. Tipo de reagentes .....	38
4.4. Tempo de contacto e tempo de ligação .....	39
4.5. Grau de agitação .....	42
4.6. Taxa de aeração .....	45
4.7. Aparelhos de flutuação. Célula e coluna .....	47
4.8. Ponto de adição do ar na coluna .....	49
4.9. Coluna. Água de lavagem e seu ponto de adição .....	50
4.10. Influência do calibre das partículas na flutuação. As partículas finas .....	52
4.10.1. Introdução .....	52
4.10.2. Recuperação versus calibre das partículas .....	54
4.10.3. Características das partículas finas .....	56
4.10.4. Influência do calibre das partículas em cada subprocesso da flutuação...	57

4.10.4.1. Introdução e preparação da alimentação .....	58
4.10.4.2. Ligação das partículas às bolhas. Flutuabilidade e hidrofobicidade versus calibre das partículas .....	61
4.10.4.3. Transporte das partículas entre a polpa e a espuma. Grau de arrastamento e selectividade da flutuação versus calibre das partículas .....	70
4.10.4.4. Comportamento das partículas na espuma .....	75
4.10.5. Métodos tendentes a melhorar a flutuação das partículas finas .....	76
4.11. Estabilidade dos agregados partículas-bolhas .....	80
4.12. A espuma .....	84
4.12.1. Espuma e sua dependência do aparelho de flutuação (célula e coluna) ...	85
4.12.2. Factores influentes na estabilidade da espuma .....	87
4.12.2.1. Tipo e concentração de espumante .....	87
4.12.2.2. Calibre e grau de hidrofobicidade das partículas .....	91
4.13. Influência da estabilidade e da altura da espuma na flutuação .....	93
4.14. Considerações finais .....	102
<b>5 - BENEFICIAÇÃO POR FLUTUAÇÃO DO CAULINO DE OLHO MARINHO</b> .....	105
5.1. Ensaios experimentais. Metodologia .....	105
5.2. Composição mineralógica do caulino de Olho Marinho .....	107
5.3. Análise dos resultados da flutuação .....	114
5.4. Influência de algumas variáveis no processo de flutuação .....	117
5.4.1. pH e concentração de ácido oleico .....	118
5.4.2. Silicato de sódio .....	131
5.4.3. Activadores .....	136
5.4.4. Concentração de sólidos e grau de agitação .....	137
5.5. Conclusões. Reorientação do trabalho .....	141
<b>6 - COMPARAÇÃO DE QUATRO MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DA CONTRIBUIÇÃO DA FLUTUAÇÃO VERDADEIRA E DA FLUTUAÇÃO FALSA (ARRASTAMENTO)</b> .....	143
6.1. Introdução .....	143
6.2. Descrição dos métodos utilizados .....	144
6.2.1. Método 1 (Trahar) .....	144
6.2.2. Método 2 (Warren) .....	144
6.2.3. Método 3 (V.Ross) .....	146
6.2.4. Método 4 (Pita - método proposto) .....	148
6.3. Quantificação da Flutuação verdadeira e avaliação da extensão do arrastamento na flutuação de minerais penalizantes de caulino .....	151
6.4. Discussão dos métodos utilizados .....	152
6.5. Discussão dos resultados .....	157
6.6. Conclusões .....	174
<b>7 - CARACTERIZAÇÃO DAS VARIÁVEIS ENVOLVIDAS NO PROCESSO DE FLUTUAÇÃO DE UM MINÉRIO EXTREMAMENTE FINO (CAULINO)</b> .....	177
7.1. - Introdução .....	177
7.2. Variáveis envolvidas no processo de flutuação de um minério fino (caulino) .....	178

7.2.1. Ácido oleico e petróleo .....	179
7.2.2. Coluna de flutuação versus célula .....	180
7.2.3. Taxa de aeração na coluna .....	182
7.2.4. Localização de entrada do ar na coluna .....	184
7.2.5. Altura da espuma na coluna .....	185
7.2.6. Estabilidade da espuma versus tempo .....	185
7.3. Resultados objecto de estudo .....	185
7.4. Metodologia de análise dos resultados experimentais .....	186
<b>8 - INFLUÊNCIA DA CONCENTRAÇÃO DO ÁCIDO OLEICO E DO PETRÓLEO .....</b>	<b>191</b>
8.1. Introdução .....	191
8.2. Amostra total .....	191
8.2.1. Recuperação total .....	191
8.2.2. Recuperação por arrastamento .....	200
8.2.3. Recuperação por flutuação verdadeira .....	205
8.3. Influência do calibre das partículas (quatro fracções granulométricas) .....	210
8.3.1. Recuperação total .....	210
8.3.2. Recuperação por arrastamento .....	215
8.3.3. Recuperação por flutuação verdadeira .....	224
8.4. Contribuição do arrastamento e da flutuação verdadeira .....	234
8.5. Conclusões .....	236
<b>9 - INFLUÊNCIA DO EQUIPAMENTO NA FLUTUAÇÃO. CÉLULA MECÂNICA VERSUS COLUNA .....</b>	<b>239</b>
9.1. Introdução .....	239
9.2. Resultados experimentais .....	240
9.2.1. Amostra total. Arrastamento e flutuação verdadeira .....	240
9.2.2. Influência do calibre das partículas .....	242
9.2.2.1. Fracção granulométrica inferior a 25 µm. Arrastamento e flutuação verdadeira .....	242
9.2.2.2. Fracção 25-45 µm. Arrastamento e flutuação verdadeira .....	248
9.2.2.3. Fracção 45-63 µm. Arrastamento e flutuação verdadeira .....	251
9.2.2.4. Fracção superior a 63 µm. Arrastamento e flutuação verdadeira .....	254
9.3. Conclusões .....	257
<b>10 - INFLUÊNCIA DA TAXA DE AERAÇÃO E DO NÍVEL DE ENTRADA DO AR NA COLUNA .....</b>	<b>261</b>
10.1. Influência da taxa de aeração .....	261
10.1.1. Introdução .....	261
10.1.2. Resultados experimentais. Discussão .....	261
10.1.2.1. Óxido de ferro .....	262
10.1.2.1.1. Óxido de ferro. Flutuação falsa (arrastamento) .....	262
10.1.2.1.2. Óxido de ferro. Flutuação verdadeira .....	263
10.1.2.2. Óxido de titânio e óxido de manganês .....	266
10.1.2.2.1. Flutuação falsa (arrastamento) .....	266
10.1.2.2.2. Flutuação verdadeira .....	268
10.1.2.3. Rendimento em peso .....	271

10.1.3. Conclusões .....	273
10.2. Influência do nível de entrada do ar na coluna .....	275
10.2.1. Introdução .....	275
10.2.2. Resultados experimentais. Discussão .....	275
10.2.2.1. Óxido de ferro, de titânio e de manganês. Arrastamento .....	275
10.2.2.2. Óxido de ferro, de titânio e de manganês. Flutuação verdadeira .....	280
10.2.2.3. Rendimento em peso .....	284
10.2.3. Conclusões .....	286
<b>11 - INFLUÊNCIA DA ALTURA DA ESPUMA NA COLUNA .....</b>	<b>289</b>
11.1. Introdução .....	289
11.2 Resultados do ajuste do modelo cinético simples de primeira ordem .....	290
11.2.1. Óxido de ferro. Flutuação falsa (arrastamento) e flutuação verdadeira ...	295
11.2.2. Óxido de titânio. Flutuação falsa (arrastamento) e flutuação verdadeira..	301
11.2.3. Óxido de manganês. Flutuação falsa (arrastamento) e flutuação verdadeira.....	305
11.3. Comparação dos resultados correspondentes aos três óxidos .....	308
11.3.1. Recuperação por arrastamento .....	309
11.3.2. Recuperação por flutuação verdadeira .....	311
11.4. Conclusões .....	317
<b>12 - ESTABILIDADE DA ESPUMA VERSUS TEMPO DE FLUTUAÇÃO ..</b>	<b>319</b>
12.1. Introdução .....	319
12.2. Óxido de ferro, óxido de titânio e óxido de manganês: Taxa de flutuação e altura crítica da espuma .....	321
12.3. <i>Óxido de ferro</i> . Taxa de flutuação versus altura da espuma. Influência do calibre das partículas e do tempo na taxa de flutuação .....	328
12.3.1. <i>Óxido de ferro</i> . Influência do calibre das partículas e do tempo na taxa de transferência da polpa para a zona da espuma pela acção do arrastamento e da flutuação verdadeira .....	333
12.3.2. <i>Óxido de ferro</i> . Influência do calibre das partículas na taxa de flutuação por arrastamento e por flutuação verdadeira. Altura crítica da espuma versus tempo .....	335
12.4. <i>Óxido de titânio</i> . Taxa de flutuação versus altura da espuma. Influência do calibre das partículas e do tempo na taxa de flutuação .....	337
12.4.1. <i>Óxido de titânio</i> . Influência do calibre das partículas e do tempo na taxa de transferência da polpa para a zona da espuma pela acção do arrastamento e da flutuação verdadeira .....	338
12.4.2. <i>Óxido de titânio</i> . Influência do calibre das partículas na taxa de flutuação por arrastamento e por flutuação verdadeira. Altura crítica da espuma versus tempo .....	340
12.5. <i>Óxido de manganês</i> . Taxa de flutuação versus altura da espuma. Influência do calibre das partículas e do tempo na taxa de flutuação .....	342
12.5.1. <i>Óxido de manganês</i> . Influência do calibre das partículas e do tempo na taxa de transferência da polpa para a zona da espuma pela acção do arrastamento e da flutuação verdadeira .....	343
12.5.2. <i>Óxido de manganês</i> . Influência do calibre das partículas na taxa de flutuação por arrastamento e por flutuação verdadeira. Altura crítica	

da espuma versus tempo .....	344
12.6. Comparação dos resultados dos três óxidos .....	346
12.7. Fenómenos de drenagem. Influência do modo de transferência do material da polpa para a espuma, do calibre das partículas e da perda de estabilidade da espuma .....	347
12.8. Conclusões .....	354
<b>13 - MODELO FENOMENOLÓGICO.</b>	
<b>FLUTUAÇÃO VERDADEIRA E ARRASTAMENTO. INFLUÊNCIA DO CALIBRE DAS PARTÍCULAS</b> .....	357
13.1. Introdução .....	357
13.2. Descrição do modelo .....	358
13.3. Aplicação do modelo .....	366
13.4. Comparação dos resultados do modelo fenomenológico com os obtidos por modelos clássicos .....	381
13.4.1. Taxa de arrastamento do modelo fenomenológico versus taxa de arrastamento do modelo cinético simples .....	381
13.4.2. Recuperação por arrastamento e por flutuação verdadeira determinada pelo modelo fenomenológico e pelo modelo de V.Ross .....	383
13.5. Conclusões .....	391
<b>14 - CONCLUSÕES GERAIS</b> .....	393
Anexos .....	403
Anexo I .....	405
Anexo II .....	417
Anexo III .....	425
Anexo IV .....	435
Anexo V .....	455
Anexo VI .....	465
<b>Bibliografia</b> .....	475



## BIBLIOGRAFIA

- Agar, G.E., Crawley, R.S. e Bruce, T.J., 1980.** Optimizing the Design of Flotation Circuits. *CIM Bulletin*, Vol.73 nº824: 173-181.
- Agar, G.E. e Barrett, J.J., 1983.** The Use of Flotation Rate Data to Evaluate Reagentes. *CIM Bulletin*, Vol.76, nº851: 157-181.
- Almeida, M.L., 1987.** Estabilidade de Suspensões de Caulinos Portugueses com Interesse Industrial. Tese de Doutoramento em Ciências e Engenharia dos Materiais. Universidade de Aveiro, 330.
- Ahmed, N. e Jameson, G.J., 1985.** The Effect of Bubble Size on the Rate of Flotation of Fine Particles. *Int. J. Miner. Process.*, 14: 195-215.
- Anfruns, J.F., Kitchener, J.A., 1977.** Rate of capture of small particles in flotation. *Trans. Inst. Min. Metall. (Sect. C: Mineral Process. Extr. Metall.)*, 86: C9-C15.
- Apling, A.C. e Ersayin, S., 1986.** Reproducibility of Semi-Batch Flotation Testwork with the Leeds Open-Top Cell and of Derived Kinetic Parameters. *Trans. Inst. Min. Metall. (Sect. C: Mineral Process. Extr. Metall.)*, 95: C83-C88.
- Arbiter, N., Harris, C.C. e Yap, R.F., 1976.** The air flow number in flotation machines scale-up. *Int. J. Miner. Process.*, 3: 257-280.
- Barros, E., 1995.** Modelação Fenomenológica da Flutuação por Espumas. Tese de Mestrado. Departamento de Minas da FEUP.
- Barros, E., Leite, M.R.M., Cavalheiro, A.T., 2000.** The Use of Ore Microscopy Data For Flotation Process Control by Means of a Liberation Model - A Case Study. A publicar na revista *CIM Bulletin*.
- Bartlett, D.R. e Mular, A.L., 1974.** Dependence of Flotation Rate on Particle Size and Fractional Mineral Content. *Int. J. Miner. Process.*, 1: 277-286.
- Baudet, G. e Morio, M., 1974.** Méthodes de Valorization des Kaolins. *Industrie Minerale-Mineralogie. Supplement*. Vol.56, nº12: 163-185.
- Bisshop, J:P., 1976.** Study of Particle Entrainment in Flotation Froths. *Trans. Inst. Min. Metall. (Sect. C: Mineral Process. Extr. Metall.)*, 85: C191-194.

- Casal Moura, A.A. e Grade, J.M.C., 1985.** Catálogo das Argilas Portuguesas Utilizadas na Indústria Cerâmica. Ministério da Indústria e Energia. Dir. Geral de Geologia e Minas.
- Cases, J.M., Degoul, P. Goujon, G e Delon, J.F, 1976.** Influence du Broyager sur les Propriétés Superficielles des Solides et sur la Collection. *Industrie Minérale-Minéralurgie*: Novembre:161-168.
- Choung, J.W., Luttrell, G.H. e Yoon, R.H., 1993.** Characterization of Operating Parameters in the Cleaning Zone of Microbubble Column Flotation. *Int. J. Miner. Process.*, 39: 31-40.
- Collins, A.M. e Read, A.D., 1971.** The Treatment of Slimes. *Miner. Sci. Eng.*, 3:19-31.
- Crawford, R., Ralston, J., 1988.** The Influence of Particle Size and Contact Angle in Mineral Flotation. *Int. J. Miner. Process.*, 23: 1-24.
- Crozier, R. D. 1992.** Flotation. Theory, Reagents and Ore Testing. Pergamon Press. 343.
- Cutting, G.W., Barber, S.P. e Newton, S., 1986.** Effects of Froth Structure and Mobility on the Performance and Simulation of Continuously Operated Flotation Cells. *Int. J. Miner. Process.*, 16: 43-61.
- Dippenaar, A., 1982.** The Destabilization of Froth by Solids. I. The Mechanism of Film Rupture. *Int. J. Miner. Process.*, 9: 1-14.
- Dippenaar, A., 1982.** The Destabilization of Froth by Solids. II. The Rate-Determining Step. *Int. J. Miner. Process.*, 9: 15-22.
- Dobby, G.S. e Finch, J.A., 1986.** Particle Collection in Column - Gas Rate and Bubble Size Effects. *Canadian Metall. Quarterly*, Vol. 25, nº1: 9-13.
- Dobby, G.S. e Finch, J.A., 1987.** Particle Size Dependence in Flotation Derived From a Fundamental Model of the Capture Process. *Int. J. Miner. Process.*, 21: 241-260.
- Dowling, E.C., Klimpel, R.R. e Aplan, F.F., 1985.** Model Discrimination in the Flotation of a Porphyry Copper Ore. *Minerals and Metallurgical Processing*, 88-101.
- Edwards, C.R., Kipkie, W.B. e Agar, G.E., 1980.** The Effect of Slime Coatings of the Serpentine Minerals, Chrysotile and Lizardite, on Pentlandite Flotation. *Int. J. Miner. Process.*, 7: 33-42.
- Espinosa-Gomes, R., Finch, J.A. e Jonson, N.W., 1988.** Column Flotation of Very Fine Particles. *Minerals Engineering*, Vol.1, 3-18.
- Fallenius, K., 1987.** Turbulence in Flotation Cells. *Int. J. Miner. Process.*, 21: 1-23.

- Falutsu, M. e Dobby, G.S., 1989.** Direct Measurement of Froth Drop Back and Collection Zone Recovery in a Laboratory Flotation Column. *Minerals Engineering*, Vol.2, nº3, 377-386.
- Falutsu, M. e Dobby, G.S., 1992.** Froth Performance in Commercial Sized Flotation Columns. In *B.A Wills (ed.), Minerals Engineering '92, Vancouver. Miner. Eng.*, 5: 1207-1223.
- Falutsu, M., 1994.** Column Flotation Froth Characteristics - Satability of the Bubble-Particle System. *Int. J. Miner. Process.*, 40: 225-243.
- Ferreira Soares, A., Pena dos Reis, R.P.B., Daveau, S. 1983.** Tentativa de Correlação das Unidades Litostratigráficas da Região do Baixo Mondego com as Bacias da Lousã e Arganil. *Memórias e Notícias, Publ. Mus. Lab. Min. Geol. Universidade de Coimbra*, nº96: 3-16.
- Feteris, S.M., Frew, J.A. e Jowett, A., 1987.** Modelling the Effect of Froth Depth in Flotation. *Int. J. Miner. Process.*, 20: 121-135.
- Finch, J.A., e Dobby, G.S., 1990.** Column Flotation, Pergamon Press, Oxford, 180.
- Flint, L.R., 1973. Factors Influencing the Flotation Cell Design. *Miner. Sci. Eng.*, 5 (3): 232-241.
- Flint, I.M., MacPhail, P. e Dobby, G.S., 1988.** Aerosol Frother Addition in Column Flotation. *CIM Bulletin*, Vol.81, nº913: 81-84.
- Frew, J.A. e Resarick, C.J., 1978.** Relationship between Flotation Rates and Pulp Density in Zinc Cleaning Circuits at Broken Hill, *Aus.I.M.M., N.W. Qld. Branch, Mill Operatos Conference*.
- Frew, J.A. e Trahar, W.J., 1982.** Roughing and Cleaning Flotation Behaviour and the Realistic Simulation of Complete Plant Performance. *Int. J. Miner. Process.*, 9: 101-120.
- Fuerstenau, D.W., Chander, S. e Abouzeid, A.M., 1979.** The Recovery of Fines Particles by Physical Separation Methods. In P. Somasundaram e N. Arbitier (ed.), *Beneficiation of Mineral Fines - Problems and Research Needs. AIME, U.S.A.*, 3-59.
- Fuerstenau, D.W., 1980.** Fine Particle Flotation. In: P. Somasundaram (ed.), *Fine Particles Processing, Vol. 1, AIME*,: 669-706.
- Gaudin, A.M., Groth, J.O, e Henderson, J.B. 1931.** Effect of Particle Size Slime on Flotation. *Am. Ins. Min. Metall. Eng. Tech.*, Publ., 414:3-23.

**Gaudin, A.M., Fuerstenau, D.W. e Miaw, H.L., 1960.** Slime Coatings in Galena Flotation. *Trans. Can. Inst. Min. Metall.*, 63: 668-671.

**Gomes, C.F., 1988.** Argilas. O Que São e Para Que Servem. Edição da Fundação Calouste Gulbenkian. 457.

**Handbook of World Mineral - Trade Statistics (1996)**

**Harris, C.C., 1978.** Multiphase Models of Flotation Machine Behaviour. *Int. J. Miner. Process.*, 5: 107-129.

**Harris, C.C., Arbiter, N. e Musa, M.J., 1983.** Mixing and Gangue Dispersion in Flotation Machine Pulps. *Int. J. Miner. Process.*, 10: 45-60.

**Heinrich, S. e Bischofberger, C., 1978.** On the Hydrodynamics of Flotation Machines. *Int. J. Miner. Process.*, 5: 131-142.

**Hemmings, C.E., 1980.** An Alternative Viewpoint on Flotation Behaviour of Ultrafine Particles. *Trans. Inst. Min. Metall. (Sect. C: Mineral Process. Extr. Metall)*, 89: C113-C120.

**Hines, P.R., 1962.** Before Flotation, in "Froth Flotation" 50th Anniversary, ed. Fuerstenau, D.W., Publ by The American Inst. Of Mining Metall., and Petroleum Engineer, Inc. 677.

**Holtham, P.N. e Cheng Ta-Wui, 1991.** Study of Probability of Detachment of Particles From in Flotation. *Trans. Instn. Min. Metall. (Sect. C: Miner. Process. Extr. Metall.)*, 100: C147-C153.

**Hu, W., Wang, D.Z. e Qu, G., 1987.** Principle and Application of Carrier Flotation. *J. Cent. South. Inst. Min. Metall.*, 4: 408-414.

**Hu, W., Wang, D.Z. e Qu, G., 1988.** Autogenous Carrier Flotation. In: K.S. Eric Forssberg (Editor), Proc. XVI Int. Miner. Process. Congr., Elsevier, Amsterdam, Part A: 445-452.

**Huertos, E.G., Monteros, J.E., 1974.** El Caolin en Espana: Características, Identificación y Ensaio Cerâmicos. Sociedade Espanola de Cerâmica y Vidro. Madrid.

**Isaac, R.A. e Kerber, J.D., 1971.** Atomic Absorption and Flame Photometry: Techniques and Uses in Soil, Plant and Water Analysis, in *Instrumental Methods for Analysis of Soils and Plant Tissue*, Walsh, L.M., Ed., Soil Science Society of America, Madison.

- Jiang, Z.W., Holtham, P.N., 1986.** Theoretical Model of Collision Between Particles and Bubbles in Flotation. *Trans. Instn. Min. Metall. (Sect. C: Miner. Process. Extr. Metall.)*, 95: C187-C194.
- Jowett, A., 1980.** Formation and Disruption of Particle-Bubble Aggregates in Flotation. In: P. Somasundaran (ed.), *Fine Particles Processing*. Vol. 1, AIME, 720-754.
- Johansson, G. e Pugh, R.J., 1992.** The Influence of Particle Size and Hydrophobicity on the Stability of Mineralized Froths. *Int. J. Miner. Process.*, 34: 1-21.
- King, R.P. et al., 1974.** Bubble Loading During Flotation. *Trans. Instn. Min. Metall. (Sect. C: Miner. Process. Extr. Metall.)*, 83: C112-C115.
- Kirjavainen, V.M., Laapas, H.R., 1988.** A Study of Entrainment Mechanism in Flotation. XVI International Mineral Congress, edited by E. Forssberg Elsevier Science Publishers B.V., 665-677.
- Kirjavainen, V.M., 1989.** Application of a Probability Model for the Entrainment of Hydrophilic Particles in Froth Flotation. *Int. J. Miner. Process.*, 27: 63-74.
- Kirjavainen, V.M., 1992.** Mathematical Model for the Entrainment of Hydrophilic Particles in Froth Flotation. *Int. J. Miner. Process.*, 35: 1-11.
- Klimpel, R.R. e Isherwood, S., 1991.** Some Industrial Implications of Changing Frother Chemical Structure. *Int. J. Miner. Process.*, 33: 369-381.
- Kosick, G.A., Kuehn, L.A. e Freberg, M., 1988.** Column Flotation of Galena at the Polaris Concentrator. *CIM Bulletin*, Vol.81, n° 920: 54-60.
- Kuzvart, M., 1977.** Kaolin Genesis. Episodes. Geological Newsletter. *Inter. Union of Geol. Sciences*, n°4 (Dezembro), 12-15.
- Laplante, A.R., Toguri, J.M. e Smith, H.W., 1983a.** The Effect of Air Flow Rate on the Kinetics of Flotation. Part 1: The Transfer of Material From the Slurry to the Froth. *Int. J. Miner. Process.*, 11: 203-219.
- Laplante, A.R., Toguri, J.M. e Smith, H.W., 1983b.** The Effect of Air Flow Rate on the Kinetics of Flotation. Part 2: The Transfer of Material From the Froth Over the Cell Lip. *Int. J. Miner. Process.*, 11: 221-234.
- Laplante, A.R., Toguri, J.M. e Smith, H.W., 1983c.** The Effect of Air Flow Rate on the Kinetics of Flotation. Part 2: Selectivity. *Int. J. Miner. Process.*, 11: 285-295.

**Levich, V.G., 1962.** Physicochemical Hydrodynamics. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 700.

**Lucas, M.D. e Sequeira, E.M., 1971.** Determinação de alumínio, cálcio, cobalto, cobre, ferro, magnésio, manganésio, potássio, sódio, titânio e zinco totais nos solos por ataque nítrico-perclórico-fluorídrico e por absorção atômica e emissão de chama, *Pedologia*, Oeiras, 6, 55-66.

**Luttrell, G.H. e Yoon, R.H., 1991.** A Flotation Column Simulator Based on Hydrodynamic Principles. *Int. J. Miner. Process.*, 33: 355-368.

**Lynch, A.J., Johnson, N.W., Manlapig, E.V. e Thorne, C.G., 1981.** Mineral and coal flotation circuits. Ed. Fuerstenau, D.W. Elsevier. Amsterdam. 290.

**Malysa, K., Barzyk, W. e Pomianowski, A., 1982.** Influence of Frothers on Floatability. I: Flotation of Single Minerals (Quartz and Synthetic Chalcocite). *Int. J. Miner. Process.*, 8: 329-343.

**Malysa, K., Barzyk, W., Czarnecki, J. e Pomianowski, A., 1982.** Influence of Frothers on Floatability. I: Flotation of Chalcocite and Quartz Mixtures. *Int. J. Miner. Process.*, 9: 121-131.

**McCuen, R.H., 1992.** Microcomputer Applications in Statistical Hydrology. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey. 306.

**Mehrotra, S.P. e Padmanabhan, N.P.H., 1990.** Analysis of Flotation Kinetics of Malanjhand Copper Ore, India, in Terms of Distributed Flotation-Rate Constant. *Trans. Instn. Min. Metall. (Sect. C: Miner. Process. Extr. Metall.)*, 99: C32-C42.

### **Mining Annual Review**

**Mital, K.V., 1976.** Optimization Methods in operations research and systems analysis. Wiley Eastern Limited. 253

**Moolman, D.W., Aldrich, C., van Deventer, J.S.J. e Stange, W.W., 1995.** The Classification of Froth Structure in a Copper Flotation Plant by Means of a Neutral Net. *Int. J. Miner. Process.*, 43: 193-208.

**Moreira, J.C.B., 1997.** Matérias Primas Minerais não Metálicas: Situação Actual e Perspectivas. *Boletim de Minas*, Vol. 34, nº4, 379-432.

**Moys, M.H. 1978.** A Study of a Plug-Flow Model for Flotation Froth Behaviour. *Int. J. Miner. Process.*, 5: 21-38.

- Mular, A.L., Musara, W.T., (?)**. Batch Column: Rate Data Measurement.
- O'Connor, C.T., Randall, E.W. e Goodall, C.M., 1990**. Measurement of the Effects of Physical and Chemical Variables on Bubble Size. *Int. J. Miner. Process.*, 28: 139-149.
- Pita, F.A.G., 1989**. Caracterização e Valorização de Caulino. Aplicação à Jazida de Olho Marinho. Secção Autónoma de Eng. de Minas da Universidade de Coimbra, FCTUC.
- Press, W.H., Flannery, B.P., Teukolsky, S.A., Vetterling, W.T., 1989**. Numerical Recipes. The Art of Scientific Computing (Fortran Version). Cambridge University Press. 702
- Reay, D. e Ratciff, G.A., 1973**. Removal of Fine Particles From Water by Dispersed air Flotation: Effects of Bubbles Size and Particle Size on Collection Efficiency. *Can. J. Chem. Eng.*, 51: 178-185.
- Reay, D. e Ratciff, G.A., 1975**. Experimental Testing of the Hydrodynamic Collision Model of Fine Particle Flotation. *Can. J. Chem. Eng.*, 53: 481-486.
- Reuter, M.A. e Deventer, J.S.J., 1992**. The Simulation and Identification of Flotation Processes by Use of a Knowledge Based Model. *Int. J. Miner. Process.*, 35: 13-49.
- Romão, M.L., 1998**. Elementos Estatísticos Sobre Indústria Extractiva em Portugal. *Boletim de Minas*.
- Ross, V. e Deventer, J.S.J.V. 1987**. A Computer Model to Predict froth Behaviour in the Scale-Up of Flotation Cells. APCOM 87. Proceedings of the Twentieth International Symposium on the Application of Computers and Mathematics in the Mineral Industries. Vol. 2 Metallurgy. Johannesburg, *SAIMM*. 73-88.
- Ross, V., 1990**. Interpretation of Froth Data to Study the Detachment of Floating Particles in Flotation Froths. *Minerals Engineering*, Vol.3, nº5, 525-531.
- Ross, V., 1990**. Flotation and Entrainment of Particles During Batch Flotation Tests. *Minerals Engineering*, Vol.3, nº3/4, 245-256.
- Ross, V., 1990**. A Study of the Froth Phase in Large-Scale Pyrite Flotation Cells. *Int. J. Miner. Process.*, 30: 143-157.
- Ross, V. e Deventer, J.S.J.V. 1990**. Evaluation of the Performance of the Froth Phase in Flotation. International Deep Mining Conference: Innovations in Metallurgical Plant. Johannesburg, *SAIMM*. 81-90.

- Ross, V., 1991.** The Behaviour of Particles in Flotation Froths. *Minerals Engineering*, Vol.4, n°7-11, 959-974.
- Ross, V., 1991.** An Investigation of Sub-Processes in Equilibrium Froths. a: The Mechanisms of Detachment and Drainage. *Int. J. Miner. Process.*, 31: 37-50.
- Ross, V., 1991.** An Investigation of Sub-Processes in Equilibrium Froths. b: The Effect of Operating Conditions. *Int. J. Miner. Process.*, 31: 51-71.
- Ross, V., 1991.** Comparasion of Methods for Evaluation of true Flotation an Entrainment. *Trans. Instn. Min. Metall. (Sect. C: Miner. Process. Extr. Metall.)*, 100: C121-C126.
- Santos, P.S., 1975.** Tecnologia de Argilas. Vol. 1 e 2, Editora Edgard Blucher Ltda., São Paulo, Brasil.
- Schubert, H. e Bischofberger, C., 1978.** On the Hydrodynamics of Flotation Machines. *Int. J. Miner. Process.*, 5: 131-142.
- Schulze, H.J., 1977.** New Theoretical and Experimental Investigations on Stability of Bubble/Particle Aggregates in Flotation: A Theory on the Upper Particle Size of Floatability. *Int. J. Miner. Process.*, 4: 241-259.
- Schulze, H.J., 1982.** Dimensionless Number and Approximate Calculations of the Upper Particle Size of Floatability in Flotation Machines. *Int. J. Miner. Process.*, 9: 321-328.
- Schulze, H.J., 1984.** "Pysico-Chemical Elementary Processes in Flotation", *Developments in Mineral Processing*, Volu.4, Elsevier, 348.
- Schulze, H.J., Radoev, B., Geidel, Th., Stechemesser, H. e Topfer, E., 1989.** Investigation of the Collision Process Between Particles and Gas Bubbles in Flotation - A Theoretical Analysis. *Int. J. Miner. Process.*, 27: 263-278.
- Sivamoham, R. e Forsberg, E., 1985.** Recovery of Heavy Minerals From Slimes. *Int. J. Miner. Process.*, 15: 297-314.
- Sivamoham, R., 1990.** The Problem of Recovering Very Fine Particles in Mineral Processing - a Review. *Int. J. Miner. Process.*, 28: 247-288.
- Souza, J.V., 1973.** Estudo Tecnológico de Algumas Argilas e Caulinos do Recôncavo do Estado da Baía. Departamento Nacional de Produção Mineral - GB, Ministério das Minas e Energia - Brasil.
- Stuart, K.N., Malcolm, D.E. e Keen Chye Teh, 1986.** Fine Particle in an Acoustic Field. *Int. J. Miner. Process.*, 17: 143-150.



**Subrahmanyam, T.V. e Forssberg, E.K.S, 1988.** Froth stability, Particle Entrainment and Drainage in Flotation - A Review. *Int. J. Miner. Process.*, 23: 33-53.

**Subrahmanyam, T.V. e Forssberg, E.K.S, 1988.** Frother Characteristics and Grade-Recovery Relationships in the Flotation of de Lead-Zinc and Copper Ores. *Minerals Engineering*, Vol.1, nº1, 41-52.

**Subrahmanyam, T.V. e Forssberg, E.K.S, 1988.** Frother Performance in Flotation of Copper and Lead-Zinc Ores. *Trans. Inst. Min. Metall. (Sect. C: Miner. Process. Extr. Metall.)*, 97: C134-C142.

**Subrahmanyam, T.V. e Forssberg, E.K.S, 1990.** Fine Particles Processing: Shear-Flocculation and Carrier Flotation - A Review. *Int. J. Miner. Process.*, 30: 265-286.

**Szatkowski, M. e Freyberger, W.L., 1985a.** Kinetics of Flotation With Fine Bubbles. *Trans. Inst. Min. Metall. (Sect. C: Miner. Process. Extr. Metall.)*, 94: C61-C70.

**Szatkowski, M. e Freyberger, W.L., 1985b.** Kinetics of Flotation With Fine Bubbles. *Trans. Inst. Min. Metall. (Sect. C: Miner. Process. Extr. Metall.)*, 96: C115-C121.

**Szatkowski, M., 1987.** Factors Influencing Behaviour of Flotation Froth. *Trans. Inst. Min. Metall. (Sect. C: Miner. Process. Extr. Metall.)*, 96: C115-C121.

**Szatkowski, M. e Freyberger, W.L, 1988.** The Effect of Bubble Size Distribution on Selectivity of Iron Ore Flotation. *Int. J. Miner. Process.*, 23: 213-227.

**Tomlinson, H.S. e Fleming, M.G. 1963.** Flotation Rate Studies. in "Mineral Processing", ed. A.Roberts, Pergamon Press.

**Trahar, W.J. e Warren, L.J., 1976.** The Flotability of Very Fine Particles - A Review. *Int. J. Miner. Process.*, 3: 103-131.

**Trahar, W.J., 1981.** A Rational Interpretation of the Role of Particle Size in Flotation. *Int. J. Miner. Process.*, 8: 289-327.

**Varbanov, R., 1984.** Flotation of Spherical Particles. *Trans. Inst. Min. Metall. (Sect. C: Miner. Process. Extr. Metall.)*, 93: C6-C8.

**Velho, J.A.L. e Gomes, C.F. 1990.** Caulino: Considerações Sobre Produções, Consumos, Mercados e Respectivas Tendências. *Boletim de Minas*, Vol.27, nº2, 195-202.

**Velho, J.A.L. e Gomes, C.F. 1997.** Mercado de Caulino: Da Estabilidade ao Redimensionamento. *Boletim de Minas*, Vol.35, nº1, 17-29.

- Warren, L.J., 1985.** Determination of the Contributions of True Flotation and Entrainment in Batch Flotation Tests. *Int. J. Miner. Process.*, 14: 33-44.
- Wheeler, D.A., 1988.** Column Flotation - The Original Column, in Froth Column. Proceedings of the 2nd Latino American Congress on Froth Flotation, Chile. 19-23 August, ed. Castro, S.H. e Alvarez, J..
- Wilson, S.G. e Frew, J.A., 1986.** Effect of Operating Variables Upon Liquid Backmixing in a Laboratory Flotation Bank. *Int. J. Miner. Process.*, 16: 281-298.
- Ye, Y. e Miller, J.D., 1989.** The Significance of Bubble/Particle Contact Time During Collision in the Analysis of Flotation Phenomena. *Int. J. Miner. Process.*, 25: 199-219.
- Ye, Y., Khandrika, S.M. e Miller, J.D., 1989.** Induction - Time Measurements at a Particle Bed. *Int. J. Miner. Process.*, 25: 221-240.
- Yianatos, J.B., Finch, J.A. e Laplante, A.R., 1986.** Holdup Profile Bubble Size Distribution of Flotation Column Froths. *Canad. Metall. Quarterly*, Vol. 25, nº1, 23-29.
- Yianatos, J.B., Finch, J.A. e Laplante, A.R., 1987.** Cleaning Action in Column Flotation Froths. *Trans. Inst. Min. Metall. (Sect. C: Miner. Process. Extr. Metall.)*, 96: C199-C205.