6ª EDIÇÃO

TRATAMENTO DE MINÉRIOS

Adão Benvindo da Luz
Silvia Cristina Alves França
Paulo Fernando Almeida Braga

República Federativa do Brasil

Presidente da República
Michel Miguel Elias Temer Lulia

Ministro de Estado da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações
Gilberto Kassab

Secretário Executivo
Elton Santa Fé Zacarias

Diretor de Gestão das Unidades de Pesquisa e Organizações Sociais
Gustavo Zarif Frayha

Coordenadora-Geral das Unidades de Pesquisa e Organizações Sociais
Isabela Sbampato Batista Reis de Paula

CETEM – Centro de Tecnologia Mineral

Diretor
Fernando Antonio Freitas Lins

TRATAMENTO DE MINÉRIOS
6ª Edição

Adão Benvindo da Luz
Engenheiro de Minas pela UFPE, Doutor em Engenharia Mineral pela EPUSP
Pesquisador Titular do CETEM/MCTIC

Silvia Cristina Alves França
Engenheira Química pela UFS, Doutora em Engenharia Química pela COPPE-UFRJ
Tecnologista Sênior do CETEM/MCTIC

Paulo Fernando Almeida Braga
Engenheiro Químico pela UFRRJ, Doutor em Engenharia Mineral pela EPUSP
Tecnologista Sênior do CETEM/MCTIC

CENTRO DE TECNOLOGIA MINERAL - CETEM
MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES - MCTIC

Rio de Janeiro
2018

Edições do Livro Tratamento de Minérios-CETEM:
Edição Histórica CETEM/MME, Convênio DNPM/CPRM, 1983 (2010)
Primeira Edição CETEM/CNPq, 1995
Segunda Edição CETEM/CNPq/MCT, 1998
Terceira Edição CETEM/MCT/FAPERJ, 2002
Quarta Edição CETEM/MCT/CVRD, 2004
Quinta Edição CETEM/MCT, 2010

Copyright © 2018 CETEM/MCTIC

Todos os direitos reservados.
A reprodução não autorizada desta publicação, no todo ou em parte,
constitui violação de copyright (Lei 5.988).

Valéria Cristina de Souza
Editoração Eletrônica

Tatiane Duarte Cardozo de Pina
Capa

Ana Maria Silva Vieira de Sá
CRB7 3982
Catalogação na Fonte

Tratamento de Minérios – 6ª Edição/Ed. Adão Benvindo da Luz, Silvia Cristina Alves França e Paulo Fernando Almeida Braga – Rio de Janeiro: CETEM/MCTIC, 2018.

984 p.: il.

1. Tratamento de minérios 2. Cominuição 3. Flotação 4. Barragem de rejeitos. I. Centro de Tecnologia Mineral. II. Luz, Adão B. (Ed.). III. França, S.C.A. (Ed.). IV. Braga, P.F.A. (Ed.).

ISBN 978-85-82610-83-1 CDD 622.7

Informações:
CETEM – Centro de Tecnologia Mineral
Av. Pedro Calmon, 900 – Cidade Universitária
21941-908 – Rio de Janeiro – RJ
Homepage: www.cetem.gov.br

APRESENTAÇÃO

Passados oito anos da edição anterior, o CETEM nos brinda com a 6ª edição do livro Tratamento de Minérios. O conteúdo tem tudo a ver com a missão do CETEM - Centro de Tecnologia Mineral, pois o Tratamento de Minérios é o cerne da Tecnologia Mineral.

Os minérios sempre exerceram papel primordial na história, na geografia e na economia do Brasil. A busca dos bandeirantes por ouro e pedras preciosas expandiu nosso território para o interior. Quem não se lembra, desde os tempos de colégio, de Fernão Dias, o "caçador de esmeraldas"? Ainda durante o período colonial, a cobiça dos portugueses pelo ouro da região de Ouro Preto motivou a Inconfidência Mineira, um importante passo para a independência do Brasil. A importância econômica de nossos minérios é reconhecida nacional e internacionalmente. Quem nunca ouviu falar de Carajás, Quadrilátero Ferrífero, nióbio de Araxá?

O Tratamento de Minérios transforma a matéria-prima extraída das minas em concentrados dos quais são produzidos os metais essenciais para a humanidade. Essas operações se inserem em um campo de conhecimento designado como Engenharia Mineral.

Em todos os campos de conhecimento, inovação é a palavra de ordem. Qual é o caminho para se chegar à inovação em Engenharia Mineral? A resposta é simples: trabalho forte e persistente em engenharia! Os avanços na Tecnologia da Informação disponibilizaram quantidade incalculável de informação em todos os campos de conhecimento, mas isso não é suficiente, pois falta o conhecimento fundamental, o CONCEITO. Este livro aborda principalmente as etapas clássicas do Tratamento de Minérios de maneira clara e objetiva, com forte fundamentação conceitual, sem deixar de lado exemplos práticos, e inclui também aspectos complementares relevantes para uma visão global da área.

A busca pela inovação em Tratamento de Minérios é, em geral, um processo lento, cuidadoso, envolvendo especialistas de diferentes campos de conhecimento, seja no desenvolvimento tanto de equipamentos, quanto de fluxogramas, de processos, de reagentes. Para os mais apressados, é importante lembrar as palavras do Prof. Peter King no encerramento do emblemático Congresso Comminution 1998, em Brisbane, Austrália:

"Para desenvolver um novo equipamento, são necessários dez anos de sangue, suor, lágrimas e muito dinheiro".

Antonio Eduardo Clark Peres
Engº Metalurgista, Ph.D
Professor Emérito da UFMG

PREFÁCIO

Em 1978, por sugestão do Prof. Roberto Cerrini Villas Bôas (*in memoriam*), então Diretor do CETEM, foi organizado o curso de tratamento de minérios constituído por sete módulos, para técnicos de nível médio das áreas de processamento mineral e análise química do CETEM. O curso foi ministrado pelos próprios pesquisadores da instituição: Engos de Minas Adão Benvindo da Luz, João Alves Sampaio (*in memoriam*), Marcio Torres Moreira Penna (*in memoriam*), Mario Valente Possa, José Orlando Câmara Dantas, Ronaldo Moreira Horta e Francisco Wilson Hollanda Vidal; Engos Químicos Hedda Vargas O. Figueira (*in memoriam*) e José Aury de Aquino; e o Eng. Metalurgista Franz Xavier Horn Filho.

A motivação do curso deveu-se ao fato que, após o início da operação do CETEM (1978), constatou-se uma carência significativa de técnicos de nível médio com formação na área mineral, no Rio de Janeiro, para ingressar no CETEM e participar daquele momento histórico de sua pré-operação. O curso de tratamento de minérios transformou-se no grande arcabouço para a 1ª Edição do livro sobre tratamento de minérios, editado pelo CETEM/CNPq em 1995, e consolidado na edição histórica **Tratamento de Minérios** (Eds. Adão B. Luz e João A. Sampaio)**,** lançada em 2010 e depositada na biblioteca do CETEM.

A iniciativa de elaborar a **6ª Edição** do livro **Tratamento de Minérios** foi do pesquisador João Alves Sampaio, que, ao final do ano de 2015, já havia iniciado a revisão de alguns capítulos para a nova edição. Os editores deixam registrada, neste prefácio, a homenagem ao pesquisador João Sampaio, que muito trabalhou pelo crescimento do CETEM.

Assim como nas edições anteriores, os capítulos da **6ª Edição** foram revisados e atualizados, sendo que os capítulos sobre **Amostragem**, **Caracterização Mineralógica de Minérios**, **Fundamentos da Flotação** e **Barragem de Rejeitos** foram escritos e/ou revisados por novos autores. Nesta edição, tem-se, ainda, o acréscimo do capítulo **Calcinação**, área que é frequentemente estudada pela pirometalurgia, mas que tem grande aplicação e interesse no beneficiamento mineral.

Na elaboração da **6ª Edição,** participaram pesquisadores, professores e profissionais experientes do CETEM, EPUSP, UFPE, UFRGS, UFRJ, UERJ, IFPI, IFRJ, IFRN, NUCLEP, SGS GEOSOL, Mineração Royal Gipso Ltda, MCE Consultoria e Engenharia Ltda, Vinicius Fonseca Consultoria, Nogueira Soluções em Engenharia e Francis Pitard Sampling Consultants (EUA).

A CBMM - Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração - incentivou e apoiou financeiramente a impressão desta **6ª Edição** do livro **Tratamento de Minérios** CETEM/MCTIC por entender a sua importância na formação de profissionais para atuar na área mineral. Nossos sinceros agradecimentos.

Neste ano, em que o CETEM completa 40 anos de atividades, os editores e autores têm a satisfação de disponibilizar este livro, como mais uma contribuição institucional para o desenvolvimento da tecnologia mineral no País.

Rio de Janeiro, abril de 2018.

Os Editores
Adão Benvindo da Luz
Silvia Cristina Alves França
Paulo Fernando Almeida Braga

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO AO TRATAMENTO DE MINÉRIOS
Adão Benvindo da Luz e Fernando Antonio Freitas Lins

CONCEITOS DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS 3
HISTÓRICO 7
DEPÓSITOS E JAZIDAS MINERAIS 10
MINERAIS E SEUS USOS 10
NECESSIDADE DE BENEFICIAMENTO 12
FINALIDADES ECONÔMICA E SOCIAL 13
MEIO AMBIENTE, ENERGIA, CO_2 E ÁGUA 14
CONSIDERAÇÕES FINAIS 18
BIBLIOGRAFIA REFERENCIADA 21
BIBLIOGRAFIA CONSULTADA 22

CAPÍTULO 2 - AMOSTRAGEM
Ana Carolina Chieregati e Francis F. Pitard

INTRODUÇÃO 27
DEFINIÇÃO DE TERMOS E SÍMBOLOS 27
O QUE É UMA AMOSTRA REPRESENTATIVA? 33
A TEORIA DA AMOSTRAGEM DE PIERRE GY 37
COMO MINIMIZAR OS ERROS DE AMOSTRAGEM 44
CONSIDERAÇÕES FINAIS 61
EXERCÍCIOS RESOLVIDOS 62
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 64

CAPÍTULO 3 - CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA DE MINÉRIOS
Luiz Carlos Bertolino, Werlem Holanda dos Santos e Anderson Costa dos Santos

INTRODUÇÃO 69
ANÁLISE MINERALÓGICA QUALITATIVA 72
ANÁLISE MINERALÓGICA SEMIQUANTITATIVA 80
DETERMINAÇÃO DO GRAU OU ESPECTRO DE LIBERAÇÃO 82
ESTUDOS COMPLEMENTARES 86
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 101

CAPÍTULO 4 - COMINUIÇÃO
4.1 PRINCÍPIOS DA COMINUIÇÃO
João Alves Sampaio (in memoriam) e Homero Delboni Júnior

INTRODUÇÃO 107
BIBLIOGRAFIA REFERENCIADA 130
BIBLIOGRAFIA CONSULTADA 131

4.2 BRITAGEM E MOAGEM
Adão Benvindo da Luz, Salvador Luiz M. de Almeida e Paulo Fernando A. Braga

BRITAGEM 135
MOAGEM 153
BIBLIOGRAFIA REFERENCIADA 182

4.3 CIRCUITOS INDUSTRIAIS DE MOAGEM AUTÓGENA E SEMI-AUTÓGENA
Homero Delboni Júnior e João Alves Sampaio (in memoriam)

INTRODUÇÃO 187
MOAGEM AG/SAG 188
EVOLUÇÃO DA MOAGEM AG/SAG 190
CIRCUITOS INDUSTRIAIS DE MOAGEM AG/SAG 193
PANORAMA BRASILEIRO 205
PROJETO 209
CAMPANHAS PILOTO DE MOAGEM AG/SAG 212
BIBLIOGRAFIA REFERENCIADA 220
BIBLIOGRAFIA CONSULTADA 221

CAPÍTULO 5 - CLASSIFICAÇÃO E PENEIRAMENTO
Julio Cesar Guedes Correia e Hudson Jean Bianquini Couto

INTRODUÇÃO 225
FUNDAMENTOS DA CLASSIFICAÇÃO 225
TIPOS DE CLASSIFICADORES 231
PENEIRAMENTO 255
BIBLIOGRAFIA CONSULTADA 269

CAPÍTULO 6 - CONCENTRAÇÃO GRAVÍTICA
Fernando Antonio Freitas Lins

PRINCÍPIOS DE CONCENTRAÇÃO GRAVÍTICA 275
CRITÉRIO E EFICIÊNCIA DE CONCENTRAÇÃO GRAVÍTICA 279
EQUIPAMENTOS GRAVÍTICOS 280
RECUPERAÇÃO DE FINOS 296
CONSIDERAÇÕES FINAIS 297
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 299

CAPÍTULO 7 - SEPARAÇÃO EM MEIO DENSO
Antônio Rodrigues de Campos, Adão Benvindo da Luz e Paulo Fernando A. Braga

INTRODUÇÃO 303
HISTÓRICO 304
TIPOS DE MEIO DENSO 305
DENSIDADE DE UMA SUSPENSÃO 310
REOLOGIA DO MEIO DENSO 311

PRINCÍPIO DA SEPARAÇÃO EM MEIO DENSO 313
APLICAÇÕES DA SEPARAÇÃO EM MEIO DENSO EM LABORATÓRIO E NA INDÚSTRIA 316
PRINCIPAIS EQUIPAMENTOS DE SEPARAÇÃO EM MEIO DENSO USADOS NAS INDÚSTRIAS 320
CIRCUITO TÍPICO DE SEPARAÇÃO EM MEIO DENSO 330
CIRCUITO INDUSTRIAL DE SEPARAÇÃO EM MEIO DENSO, USANDO TAMBOR DE MEIO DENSO, PARA CONCENTRAÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO 332
CONTROLE OPERACIONAL E AVALIAÇÃO DAS OPERAÇÕES DE SEPARAÇÃO EM MEIO DENSO 333
DESENVOLVIMENTOS RECENTES 336
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 337

CAPÍTULO 8 - SEPARAÇÃO MAGNÉTICA E ELETROSTÁTICA
João Alves Sampaio (in memoriam), Adão Benvindo da Luz, Silvia Cristina Alves França e Ligia Mara Gonzaga

SEPARAÇÃO MAGNÉTICA 341
SEPARAÇÃO ELETROSTÁTICA 364
AVANÇOS NA SEPARAÇÃO ELETROSTÁTICA 372
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 374
APÊNDICE 378

CAPÍTULO 9 - FUNDAMENTOS DA FLOTAÇÃO
Carlos Adolpho Magalhães Baltar

INTRODUÇÃO 383
INTERFACE SÓLIDO-LÍQUIDO 385
INTERFACE GÁS-SÓLIDO 391
INTERFACE LÍQUIDO-GÁS 395
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 398

CAPÍTULO 10 - FLOTAÇÃO
Arthur Pinto Chaves, Laurindo de Salles Leal Filho e Paulo Fernando Almeida Braga

INTRODUÇÃO 405
PROCESSOS DE FLOTAÇÃO 408
EQUIPAMENTOS 410
CIRCUITOS DE BENEFICIAMENTO 425
INSTALAÇÕES DE BENEFICIAMENTO 434
REAGENTES DE FLOTAÇÃO 436
DESENVOLVIMENTOS RECENTES 450
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 455
GLOSSÁRIO 458

CAPÍTULO 11 - FLOTAÇÃO EM COLUNA
José Aury de Aquino, Maria Lúcia M. de Oliveira e Maurílio Dias Fernandes

INTRODUÇÃO 463
HISTÓRICO 463
DESCRIÇÃO DA COLUNA 464
TERMINOLOGIA 466
CARACTERÍSTICAS OPERACIONAIS 468
VARIÁVEIS DA COLUNA DE FLOTAÇÃO 475
INSTRUMENTAÇÃO E CONTROLE 485
DIMENSIONAMENTO E PERFORMANCE DA COLUNA 488
COMPARAÇÃO: CÉLULA MECÂNICA X COLUNA 503
APLICAÇÕES 504
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 509

CAPÍTULO 12 - AGREGAÇÃO NA SEPARAÇÃO SÓLIDO-LÍQUIDO
Carlos Adolpho Magalhães Baltar

INTRODUÇÃO 513
SISTEMAS COLOIDAIS 514
PROCESSOS DE AGREGAÇÃO 516
BIBLIOGRAFIA REFERENCIADA 539

CAPÍTULO 13 - REOLOGIA NO TRATAMENTO DE MINÉRIOS
Mario Valente Possa, Christine Rabello Nascimento e Silvia Cristina Alves França

INTRODUÇÃO 549
CARACTERIZAÇÃO DA POLPA 550
VISCOSIDADE 557
REOLOGIA NO PROCESSAMENTO MINERAL 567
SÍMBOLOS E UNIDADES 585
BIBLIOGRAFIA REFERENCIADA 587
BIBLIOGRAFIA CONSULTADA 592
ANEXOS 593

CAPÍTULO 14 - SEPARAÇÃO SÓLIDO-LÍQUIDO
Silvia Cristina Alves França e Giulio Massarani (in memoriam)

INTRODUÇÃO 597
ESPESSAMENTO 608
FILTRAÇÃO COM FORMAÇÃO DE TORTA 626
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 644

CAPÍTULO 15 - AGLOMERAÇÃO

15.1 BRIQUETAGEM

Eduardo Augusto de Carvalho, Valter Brinck e Antônio Rodrigues de Campos

INTRODUÇÃO 651
A BRIQUETAGEM NO BRASIL 652
CONCEITOS 653
PROCESSO DE BRIQUETAGEM 656
AGLUTINANTES 661
BRIQUETAGEM SEM AGLUTINANTES 663
BRIQUETAGEM A QUENTE 664
ATIVIDADES DE PESQUISA & DESENVOLVIMENTO 665
AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DOS BRIQUETES 666
EQUIPAMENTOS DE BRIQUETAGEM 669
BIBLIOGRAFIA REFERENCIADA 673
BIBLIOGRAFIA CONSULTADA 674

15.2 PELOTIZAÇÃO

Vincius Oliveira Fonseca e Antônio Rodrigues de Campos

INTRODUÇÃO 677
MERCADO DE PELOTAS 682
PROCESSO DE PELOTIZAÇÃO 685
ASPECTOS METALÚRGICOS E ESTRUTURAIS EM PELOTAS DE MINÉRIO DE FERRO 703
ESTOCAGEM E EMBARQUE DAS PELOTAS 716
PARÂMETROS DE QUALIDADE DAS PELOTAS DE MINÉRIO DE FERRO 717
BIBLIOGRAFIA REFERENCIADA 722
BIBLIOGRAFIA CONSULTADA 724

CAPÍTULO 16 - CALCINAÇÃO

Antônio Rodrigues de Campos, Adão B. da Luz, Flavia de Freitas Bastos e Igor Nogueira

INTRODUÇÃO 727
ASPECTOS TERMODINÂMICOS DA CALCINAÇÃO 728
CINÉTICA DA CALCINAÇÃO 729
PROCESSOS DE CALCINAÇÃO 730
BIBLIOGRAFIA REFERENCIADA 750
BIBLIOGRAFIA CONSULTADA 752

CAPÍTULO 17 - ÁGUA NO PROCESSAMENTO MINERAL

João A. Sampaio (in memoriam), Adão B. da Luz, Mônica C. de Andrade e Silvia C. A. França

INTRODUÇÃO 755
FONTES DE ÁGUA UTILIZADA NA MINERAÇÃO 757
USO DA ÁGUA NA LAVRA 759
USO DA ÁGUA NA CONCENTRAÇÃO DE MINÉRIOS 760
EFLUENTES DA MINERAÇÃO 764

Reutilização da Água na Mineração 766
Processos de Tratamento de Efluentes 772
Monitoramento 782
Considerações Finais 784
Referências Bibliográficas 786

Capítulo 18 - Aspectos Ambientais nos Setores Mineiro e Metalúrgico
André Azevedo, Ramiro Etchepare, Cristiane Oliveira, Renato Silva e Jorge Rubio

Apresentação 797
Introdução 797
Material Particulado Disperso: Características e Abatimento 800
Efluentes Líquidos – Reagentes Residuais 805
Drenagens Ácidas de Minas (DAM) 811
Processos para o Tratamento de Efluentes Líquidos 818
Separação em Bacias de Decantação 819
O Processo de Flotação no Tratamento de Efluentes 820
Processos Existentes e Emergentes 820
A Flotação por Ar Dissolvido - FAD 821
Estudos de Casos – Tratamento Ativo de DAM 827
Considerações Finais 832
Agradecimentos 834
Referências Bibliográficas 834

Capítulo 19 - Barragem de Rejeitos
Lindolfo Soares e Maria Eugenia Gimenez Boscov

Introdução 845
Segurança das Barragens de Rejeitos 846
Concepção do Projeto de Barragem de Rejeitos 848
Barragens Construídas com o Próprio Rejeito 850
Principais Características Geotécnicas dos Rejeitos 859
Avaliação de Capacidade de Armazenamento 865
Principais Métodos Construtivos de Barragens de Contenção de Rejeitos 867
Sistemas Extravasores de Barragens de Rejeitos 875
Principais Condicionantes da Escolha do Sítio de Implantação de Barragens de Contenção de Rejeitos 879
Tratamento das Fundações 887
Operação de Barragens de Rejeitos 894
Fase de Desativação de Barragens de Rejeito 897
Instrumentação 900
Referências Bibliográficas 906
Bibliografia Consultada 907

CAPÍTULO 20 - VIABILIDADE ECONÔMICA DE PROJETOS MINEIROS

Gilson Ezequiel Ferreira, Francisco Wilson H. Vidal e Roberto Carlos da C. Ribeiro

INTRODUÇÃO 917
ASPECTOS GERAIS DE UM PROJETO DE MINERAÇÃO 917
MERCADO 918
ENGENHARIA DO PROJETO 919
AVALIAÇÃO DE CUSTO 921
CONSIDERAÇÕES SOBRE A AVALIAÇÃO ECONÔMICA 924
FLUXO DE CAIXA DE UM PROJETO 925
VALOR DO DINHEIRO NO TEMPO 930
TÉCNICAS DE AVALIAÇÃO ECONÔMICA 931
ESTUDO DE CASO 943
BIBLIOGRAFIA CONSULTADA 958

ÍNDICE REMISSIVO

Nesta 6ª Edição do Tratamento de Minérios/CETEM-MCTIC, os Editores mantiveram o mesmo número de capítulos da Edição anterior (20), no entanto fizeram algumas substituições visando outras áreas do conhecimento, bem como levar aos leitores alguns avanços ocorridos nesse período de 7 anos, entre a 5ª e a 6ª Edição.

Como se trata de um livro na área mineral, contamos, como em outras Edições, com a colaboração das principais instituições universitárias de ensino e pesquisa deste País na área mineral, bem como de consultores atuantes no segmento da engenharia mineral.

Prosseguimos com o mesmo espírito de, cada vez mais, estar contribuindo para o crescimento da indústria mineral que, ao considerar o beneficiamento dos minerais e as suas transformações (metalurgia extrativa, siderurgia, bem como produtos não-metálicos resultantes), atinge, hoje, um *Produto Interno Bruto* (PIB) de 4,0% e corresponde a cerca de 20% das exportações brasileiras.

Adão Benvindo da Luz
Sílvia Cristina Alves França
Paulo Fernando Almeida Braga

Editores

ISBN 978-85-82610-83-1
9 788582 610831

CETEM
CENTRO DE TECNOLOGIA MINERAL

MINISTÉRIO DA
CIÊNCIA, TECNOLOGIA,
INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES