

Série Tecnologia Ambiental

Desaguamento de Rejeitos Minerai para Aplicação de Métodos de Disposição Alternativos às Barragens de Rejeito Convencionais

Silvia Cristina Alves França
Bruna Câmara Trampus

SÉRIE TECNOLOGIA AMBIENTAL

**Desaguamento de Rejeitos Minerais para Aplicação
de Métodos de Disposição Alternativos às Barragens
de Rejeitos Convencionais**

PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA

Michel Miguel Elias Temer Lulia

Presidente

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES

Gilberto Kassab

Ministro de Estado da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações

Elton Santa Fé Zacarias

Secretário Executivo

Gustavo Zarif Frayha

Diretor de Gestão das Unidades de Pesquisa e Organizações Sociais

Isabela Sbampato Batista Reis de Paula

Coordenadora-Geral das Unidades de Pesquisa e Organizações Sociais

CETEM – CENTRO DE TECNOLOGIA MINERAL

Fernando Antonio Freitas Lins

Diretor

Durval Costa Reis

Coordenador de Administração - COADM

Robson de Araújo D'Ávila

Coordenador de Planejamento, Gestão e Inovação - COPGI

Claudio Luiz Schneider

Coordenador de Processamento e Tecnologias Minerais - COPTM

Andréa Camardella de Lima Rizzo

Coordenadora de Processos Metalúrgicos e Ambientais - COPMA

Francisco Wilson Hollanda Vidal

Coordenador do Núcleo Regional do Espírito Santo - CONES

José Antônio Pires de Mello

Coordenador de Análises Minerais - COAMI

SÉRIE TECNOLOGIA AMBIENTAL

ISSN 0103-7374

ISBN 978-85-8261-086-2

STA - 102

Desaguamento de Rejeitos Minerais para Aplicação de Métodos de Disposição Alternativos às Barragens de Rejeitos Convencionais

Silvia Cristina Alves França

Eng. Química, M.Sc. e D.Sc. em Sistemas Particulados pelo
Programa de Engenharia Química da COPPE/UFRJ
Tecnologista Sênior do CETEM/MCTIC

Bruna Câmara Trampus

Eng. Química, M.Sc. pelo Programa de Engenharia
Química da COPPE/UFRJ. Bolsista PCI do CETEM/MCTIC

CETEM/MCTIC

2018

SÉRIE TECNOLOGIA AMBIENTAL

Luis Gonzaga Santos Sobral

Editor

Andréa Camardella de Lima Rizzo

Subeditora

CONSELHO EDITORIAL

Marisa Bezerra de M. Monte (CETEM), Paulo Sergio M. Soares (CETEM), Saulo Rodrigues P. Filho (CETEM), Sílvia Gonçalves Egler (CETEM), Vicente Paulo de Souza (CETEM), Antonio Carlos Augusto da Costa (UERJ), Fátima Maria Zanon Zotin (UERJ), Jorge Rubio (UFRGS), José Ribeiro Aires (CENPES), Luis Enrique Sánches (EPUSP), Virginia Sampaio Ciminelli (UFMG).

A Série Tecnologia Ambiental divulga trabalhos relacionados ao setor minerometalúrgico, nas áreas de tratamento e recuperação ambiental, que tenham sido desenvolvidos, ao menos em parte, no CETEM.

O conteúdo desse trabalho é de responsabilidade exclusiva do(s) autor(es).

Valéria Cristina de Souza

Coordenação Editorial e Editoração

Luis Gonzaga Santos Sobral

Revisão

Ana Maria Silva Vieira de Sá

CRB7 3982

Catálogo na Fonte

França, Sílvia Cristina Alves

Desaguamento de rejeitos minerais para aplicação de métodos de disposição alternativos às barragens de rejeitos convencionais / Sílvia Cristina Alves França [et al.]. — Rio de Janeiro: CETEM/MCTIC, 2018.

59p.: il. (Série Tecnologia Ambiental, 102)

1. Rejeitos de mineração. 2. Desaguamento. 3. Métodos de disposição. I. Centro de Tecnologia Mineral. II. França, Sílvia Cristina Alves. III. Trampus, Bruna Câmara. IV. Título. V. Série.

CDD – 622.5

SUMÁRIO

RESUMO _____	7
ABSTRACT _____	8
1 INTRODUÇÃO _____	9
2 ESTADO DA ARTE NA PRODUÇÃO DE REJEITOS NA INDÚSTRIA MINERAL – QUALIFICAÇÃO DO PROBLEMA _____	12
2.1 Apresentação do Problema/Desafio _____	12
2.2 Volumes de Produção de Mineral no Brasil e Perspectivas de Produção de Rejeitos _____	17
2.3 Polímeros Floculantes para Agregação de Partículas (convencionais e naturais) _____	18
2.4 Minimização no Uso de Barragens de Rejeitos Convencionais _____	20
2.5 Espessamento e Filtragem para Produção de Rejeitos Desaguados _____	22
3 REJEITOS DA MINERAÇÃO _____	24
3.1 Rejeitos em Forma de Polpa _____	24
3.2 Rejeitos Adensados e Pastas Minerais _____	27
3.3 Rejeitos Filtrados _____	31
4 CARACTERIZAÇÃO REOLÓGICA DE REJEITOS MINERAIS _____	35
4.1 Tensão de Escoamento _____	35
4.2 Teste de Abatimento – <i>Slump Test</i> _____	38
4.3 Exemplos Práticos de Produção de Rejeitos Espessados, Pastas Minerais e Rejeitos Filtrados em Laboratório _____	40

5 NOVAS ABORDAGENS NA DISPOSIÇÃO DE REJEITOS MINERAIS	46
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	50
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51

RESUMO

A demanda por recursos minerais e bens de consumo mantém-se alta e, certamente, crescente para atender ao aumento da população mundial e dos seus padrões de qualidade de vida. A esses fatos soma-se a queda na qualidade das jazidas, com minérios de menor aproveitamento, que juntos promovem a geração de quantidades cada vez maiores de rejeitos, assim como a necessidade de expansão das estruturas de armazenamento/disposição dos mesmos. Ao mesmo tempo, cresce a frequência dos acidentes que vêm ocorrendo com as barragens, o que desperta a atenção da comunidade técnico-científica e Governo para a questão da segurança dessas obras e sua operação. Estudiosos e especialistas em construção e monitoramento de barragens apontam para a necessidade de modificação no processo de produção dos rejeitos, destacando que a disposição com baixo grau de saturação é o processo mais promissor para redução de riscos e isso se dará pela utilização de operações de desaguamento (espessamento e filtragem) mais eficientes na produção de pastas minerais e para a recuperação de água de processo. Além disso, tem-se o registro de que 47% dos acidentes ocorridos com barragens tiveram como causa principal a perda de resistência estrutural, devido à presença de água excessiva no rejeito. A produção de rejeitos pastosos e não saturados leva à possibilidade de empilhamento dos mesmos, adotando-se a forma seca de disposição, minimizando a necessidade de barragens de rejeitos convencionais, além da maximização da recuperação de água. Como resultado pretende-se ter mais conhecimento sobre a produção e as características finais (físico-química de superfície, reologia, desaguamento) desses rejeitos, descrição matemática dos fenômenos envolvidos, maior colaboração interinstitucional e maior competência técnica para atendimento às demandas do setor, em prol de uma mineração mais sustentável.

Palavras-chave

Rejeitos de mineração; desaguamento; métodos de disposição; barragens de rejeito convencionais; recuperação de água de processo; sustentabilidade na atividade mineral.

ABSTRACT

The demand for mineral resources and consuming goods remains high and certainly increasing to meet the increase of the world population and its standards of living. To these facts, there is a drop in the quality of the mineral deposits, with lower content ores, which together promote the generation of increasing amounts of tailings, as well as the need to expand the structures for their storage/disposal. At the same time, the frequency of accidents that occur with the dams is growing, which arouses the attention of the technical-scientific community and Government to the question of the safety of these works and their operation. Scholars and specialists in raising and monitoring of dams point out to the need for modification in tailings production process, noting that the low saturation arrangement is the most promising process for risk reduction and this will be done through the use of dewatering operations (thickening and filtration) more efficient in the production of mineral pastes and for the recovery of process water. In addition, it is recorded that 47% of the accidents occurred with dams had as main cause the loss of structural resistance due to the presence of excessive water in the tailings. The production of pasty and unsaturated wastes leads to the possibility of stacking them, adopting the dry form of disposal, minimizing the need for conventional tailings dams, and maximizing water recovery. As a result, we intend to have more knowledge about the production and final characteristics (surface physico-chemical, rheology, dewatering) of these wastes, mathematical description of the phenomena involved, greater interinstitutional collaboration and greater technical competence to meet the demands of the sector, for more sustainable mining.

Keywords

Mining tailings; dewatering; disposal methods; tailings dam; water recovery; sustainable mining activities.

1 | INTRODUÇÃO

A demanda por recursos minerais e bens de consumo mantém-se alta e, certamente, crescente, para atender ao aumento da população mundial e dos seus padrões de qualidade de vida. A esses fatos soma-se a queda na qualidade das jazidas, com minérios de menor aproveitamento, que juntos promovem a geração de quantidades cada vez maiores de rejeitos, assim como a necessidade de expansão das estruturas de armazenamento/disposição dos mesmos. Ao mesmo tempo, cresce a frequência dos acidentes ocorridos com as barragens, o que desperta a atenção da comunidade técnico-científica e Governo para a questão da segurança dessas obras e sua operação.

Estudiosos e especialistas em construção e monitoramento de barragens apontam para a necessidade de modificação no processo de produção dos rejeitos, destacando que:

- i) a redução do teor de umidade dos rejeitos, para disposição com baixo grau de saturação, é o processo mais promissor para redução de riscos e isso se dará pela utilização de operações de desaguamento (espessamento e filtragem), para produção de polpas com alta densidade antes de disposição nas barragens de rejeito;
- ii) a disposição de rejeitos em forma de pastas é uma vertente relativamente nova, que vem sendo defendida por muitos estudiosos e técnicos, devido à maior segurança operacional; porém, a produção de pastas minerais por espessamento requer, ainda, estudos mais aprofundados de reologia e modelos matemáticas que consigam prever o seu comportamento ante ao bombeamento e empilhamento nas barragens ou áreas de disposição;

iii) as operações de desaguamento são importantes, ainda, na recuperação de água de processo e redução do consumo de água nas operações de beneficiamento, conferindo maior sustentabilidade à atividade de mineração;

iv) adicionalmente, 47% dos acidentes ocorridos com barragens tiveram como causa principal a liquefação, que é a perda de resistência por deformação, acarretada, principalmente, pela presença de água na massa de rejeito.

A metodologia tradicional de disposição de rejeitos em forma de polpa requer grandes áreas para disposição e apresenta grande impacto ambiental. Em consequência disso, as empresas de mineração têm dificuldade na aquisição de novos licenciamentos (GUIMARÃES et al., 2012). A proximidade de áreas urbanas e a pressão da sociedade e dos meios de comunicação têm despertado a necessidade da aplicação de alternativas às barragens de rejeito convencionais.

A produção de rejeitos pastosos e não saturados leva à possibilidade de empilhamento dos mesmos, adotando-se a forma seca de disposição, minimizando a necessidade de barragens de rejeitos convencionais. A vantagem desse tipo de disposição vai além da segurança, atingindo, especialmente, a maximização na recuperação da água contida nos rejeitos.

Estão em desenvolvimento no Laboratório de Separação Sólido-Líquido da Coordenação de Processos Mineraiis (COPM) do Centro de Tecnologia Mineral (CETEM) projetos tecnológicos com foco nas operações de espessamento mineral de alta concentração (pastas) e recuperação de água industrial em plantas de processamento de finos (LOAYZA et al., 2015; TRAMPUS e FRANÇA, 2017). Em ambos os casos há a utilização de polímeros floculantes visando a melhor

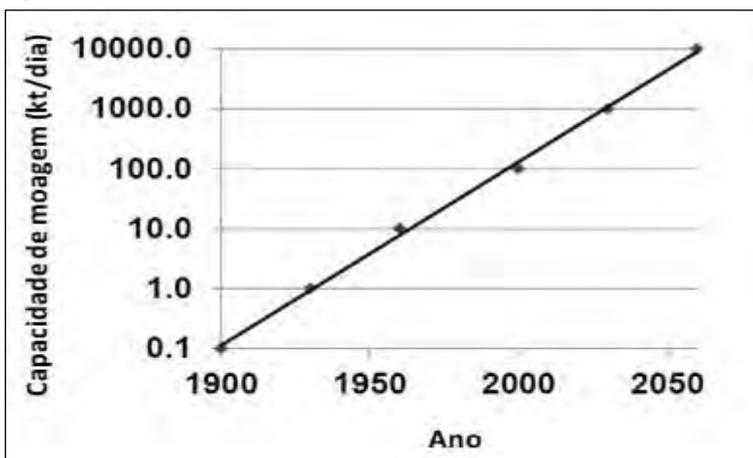
eficiência das operações de espessamento e filtragem na produção de pastas minerais e de recirculação de água de processo, com características adequadas para retornar ao processo industrial ou descarte.

Dessa forma, vislumbra-se, nesse documento, a oportunidade do conhecimento do estado da arte e a identificação de possibilidade de ações de pesquisa e desenvolvimento tecnológico, além do estabelecimento de parcerias entre governo, centros tecnológicos, universidades e empresas de mineração, para fortalecer a prática do uso de operações de desaguamento de rejeitos da mineração, promovendo a disposição de maneira mais segura, dos pontos de vista ambiental, social e econômico.

2 | ESTADO DA ARTE NA PRODUÇÃO DE REJEITOS NA INDÚSTRIA MINERAL – QUALIFICAÇÃO DO PROBLEMA

2.1 | Apresentação do Problema/Desafio

A crescente demanda pelos bens de consumo e a redução de teor dos minerais de interesse nas minas, promovem o aumento gradativo da capacidade produtiva das empresas de mineração, ao tempo em que aumentam em maior proporção ainda, a quantidade de rejeitos gerados. Um estudo realizado por Robertson (2013) apresentou a evolução da capacidade de processamento de grandes empresas de mineração ao longo dos anos (Figura 1), onde é possível inferir, de maneira indireta, os grandes volumes de água demandados e de rejeitos produzidos.



Fonte: Adaptado de Robertson (2013).

Figura 1. Evolução da capacidade de alimentação de grandes usinas de beneficiamento no mundo.

A atividade de mineração é altamente demandante por grandes volumes de água e geradora de enormes quantidades de rejeitos, os quais deverão ser dispostos de maneira sustentável, com custo reduzido e de maneira ambientalmente aceitável. Por serem a parte indesejada do recurso mineral explorado - conseqüentemente, sem valor econômico imediato - os rejeitos são, muitas vezes, tratados com menor atenção e investimentos financeiro, de pessoal e tecnológico (ÁVILA e BICUDO, 2014).

Franca (2009), em estudo sobre barragens de rejeito de grandes empresas de mineração, apresenta um diagrama (Figura 2) com as diferentes etapas da cadeia de produção mineral, apontando os diferentes pontos de geração de resíduos e rejeitos.

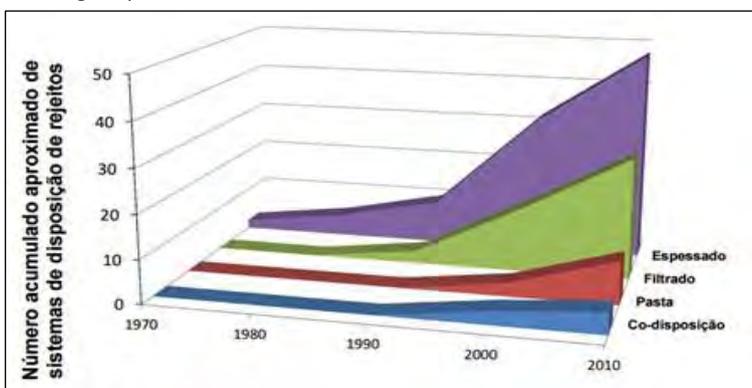


Fonte: (Franca, 2009).

Figura 2. Diagrama da produção mineral, desde a mina até a barragem de rejeitos.

A disposição dos rejeitos de mineração é feita, em sua maioria, na forma de polpa concentrada. O desaguamento é a etapa final do processo de beneficiamento mineral e tem papel fundamental nas características finais do rejeito produzido. O uso de espessadores próximo à usina de beneficiamento permite a recuperação parcial e recirculação de água de processo e reagentes a custos relativamente baixos (SOARES, 2010), auxiliando, também, na redução de captação de água nova, que reflete em menores custo operacional e impacto ambiental.

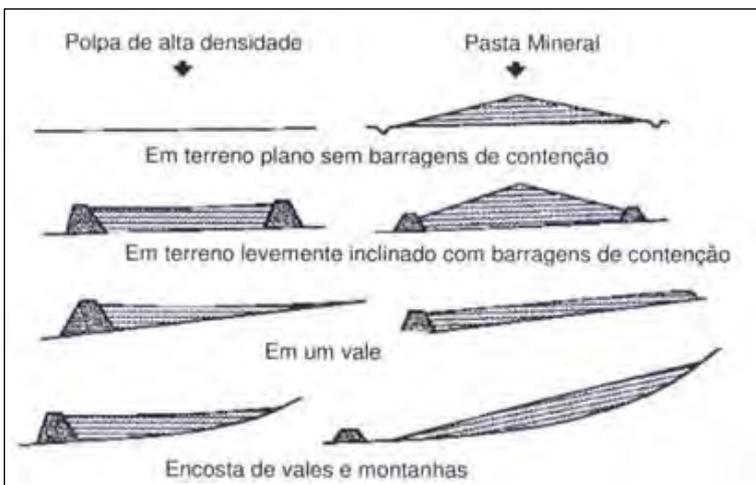
A escassez de água de qualidade, devido a fatores climáticos e questões ambientais, bem como a competição pelo seu uso entre comunidades e outras atividades como agricultura é um dos fatores que impulsiona a aplicação de novas tecnologias para a disposição de rejeitos da mineração (FALCUCCI e PERES, 2010). Na Figura 3 é apresentada uma distribuição dos sistemas de disposição de rejeitos minerais, em que se pode notar que o desaguamento convencional (espessamento e filtragem) ainda é o sistema dominante.



Fonte: (de Ávila, 2015; Davies, 2011).

Figura 3. Distribuição dos sistemas de disposição de rejeitos.

Os rejeitos em forma de pastas requerem menores áreas para disposição, conforme Figura 4, apresentada por Tessarotto (2015); além disso, esse processo possibilita a recuperação e reuso de maior volume de água, uma vez que estão bem mais secos do que os rejeitos em polpa convencionais (40-50% de sólidos p/p).

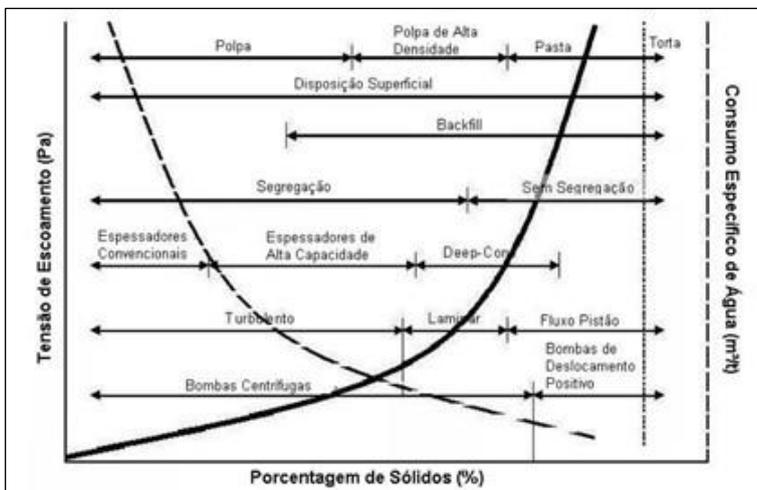


Fonte: (Tessarotto, 2015).

Figura 4. Alternativas para disposição de rejeitos: comparação entre os métodos de disposição convencional e em pastas.

Entretanto, a produção de pastas ainda é um processo que envolve custos elevados e trabalho de engenharia reversa, conforme mencionado na abordagem de Falcucci e Peres (2010). Primeiro devem ser determinadas as propriedades reológicas do rejeito, a melhor forma para disposição, como será realizado o seu manuseio (transporte, bombeamento) e, então, define-se qual equipamento é mais apropriado para a produção do rejeito pastoso. Nesse mesmo estudo os autores

apresentam um gráfico (Figura 5) que relaciona as variáveis e condições operacionais envolvidas no processo de produção de pastas minerais.



Fonte: Falcucci e Peres (2010).

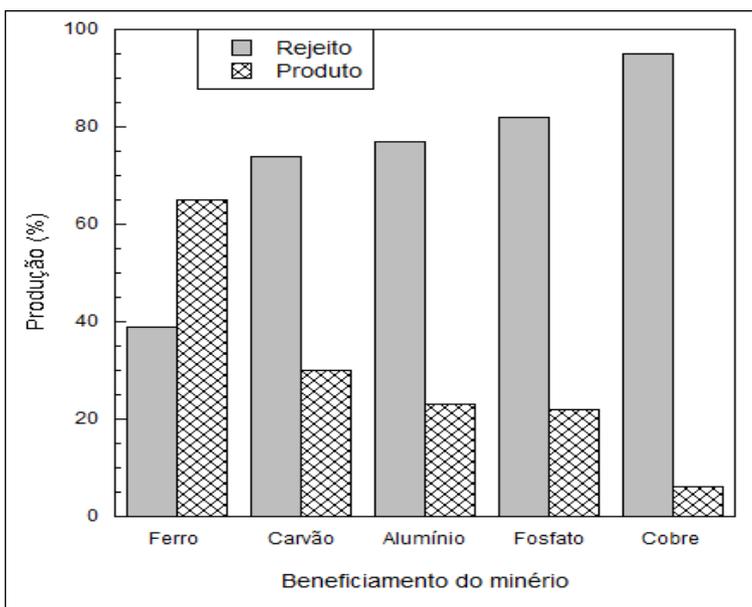
Figura 5. Aspectos práticos envolvidos na produção de pastas minerais.

A adoção de novas tecnologias que incluem o desaguamento (essamento e filtração) dos rejeitos deve ser cada vez mais frequente e deverá ter preferência nos novos projetos de empreendimentos mineiros, pois a água é - além de um recurso caro e finito - o maior agente de instabilidade de barragens de rejeito (FREIRE NETO, 2009; ÁVILA, 2015).

O emprego de operações de desaguamento dos rejeitos, como essamento de pastas, filtração, secagem e disposição a seco, promoverá a redução no consumo de água de muitas unidades de beneficiamento mineral, o que é visto como um grande desafio para os profissionais da engenharia.

2.2 | Volumes de Produção de Mineral no Brasil e Perspectivas de Produção de Rejeitos

Soares e Boscov (2018) apresentam a relação mássica entre a produção de concentrado e rejeito para alguns bens minerais (Figura 6).



Fonte: Adaptado de Soares e Boscov (2017); Alunorte (2010).

Figura 6. Comparação entre as quantidades médias de concentrado e rejeito produzidas no beneficiamento de 1 t de minério.

No ano de 2014 o Brasil bateu recordes na produção de bauxita (34 Mt) e minério de ferro (400 Mt), dentre outras substâncias minerais (MANCIN, 2015). Os elevados valores de produção estão atrelados à geração de grandes quantidades de rejeitos, que demandam por tratamento e grandes áreas (barragens ou depósitos de resíduos) para descarte.

Especificamente, para cada tonelada produzida de minério de ferro, por flotação/separação magnética, gera-se, em média, 0,6 t de rejeito. Se considerarmos que 65% do minério de ferro no Brasil são produzidos por essa rota, são geradas, anualmente, cerca de 160 Mt de rejeito de minério de ferro.

Na cadeia do alumínio, gera-se um rejeito no beneficiamento do minério e, posteriormente, no processo de produção de alumina gera-se outro rejeito, a lama vermelha - resíduo cáustico, de granulometria muito fina e quimicamente perigoso. As proporções de rendimento médio no processo produtivo são de 5t de bauxita para produzir 2t de alumina e, posteriormente, 1t de alumínio primário (ALUNORTE, 2010).

Silva Filho et al. (2007) compilaram dados da literatura sobre a relação de produção de alumina e de lama vermelha e chegou a uma faixa de 1 a 2t de lama vermelha por t de alumina produzida, para várias refinarias no mundo. Considerando-se o valor médio de 1,5t e a produção nacional de alumina em 2016 de 10,4 Mt (ABAL, 2017) a produção nacional de lama vermelha pode ter superado as 15 Mt.

2.3 | Polímeros Floculantes para Agregação de Partículas (convencionais e naturais)

A quantidade de partículas finas contida nos rejeitos de mineração tem papel fundamental na eficiência de separação sólido-líquido. Além disso, o tamanho reduzido, as cargas de superfície e o elevado valor de área superficial das partículas tornam a separação das fases difícil e extremamente lenta, inviabilizando a sua aplicação em processos industriais. Os polímeros floculantes (geralmente, poliácridamidas de médio

e alto pesos moleculares) são amplamente empregados, na indústria mineral, no espessamento de concentrados e rejeitos e na clarificação/recuperação de água de processo/efluentes.

O peso molecular e a dosagem dos polímeros têm grande influência nas propriedades (diâmetro e densidade) dos flocos formados e, conseqüentemente, no seu desempenho durante as operações de desaguamento. Altas taxas de sedimentação são resultantes de flocos de maior tamanho; porém, a consolidação do sedimento não é tão elevada devido à grande quantidade de água retida na estrutura do floco (PARSAPOUR et al., 2014; CHAVES et al., 2013).

Em se tratando da separação sólido-líquido para a recuperação de água industrial, as polpas, ou rejeitos contendo minerais argilosos, são de mais difícil processamento devido à estrutura lamelar de grande parte dos minerais silicatados presentes, havendo a necessidade, visível, da floculação. Alguns trabalhos (MIERCZYNSKA-VASILEV et al., 2013; PARSAPOUR et al., 2014) relatam que o aumento do peso molecular dos polímeros floculantes reduz a densidade dos flocos, devido ao aumento da quantidade de água intraflocular, enquanto polímeros com peso molecular relativamente menor podem produzir flocos de maior densidade, pois aprisionam na sua estrutura menor quantidade de água.

Polímeros naturais, de menor custo e ambientalmente amigáveis, como quitosana e ácido húmico, vêm sendo estudados na floculação de partículas superfinais de efluentes da mineração (LOAYZA, 2015; FRANÇA et al., 2015), com resultados promissores na redução de turbidez do efluente tratado (acima de 95%), o que permite o reuso da água nas operações industriais de beneficiamento mineral.

A escolha do polímero floculante será primordial na produção de flocos com tamanho e estrutura (quantidade de água agregada) adequados às operações subsequentes de desaguamento, além de possibilitar o reuso da água (REZENDE NETO et al., 2015). A eficiência de separação sólido-líquido também tem relação direta com o tipo de equipamento utilizado, tanto no espessamento quanto na filtragem.

Finalmente, o entendimento das características inerentes ao processo de formação da estrutura floculada, bem como a remoção da água dessa estrutura, aplicação de técnicas de medida do tamanho dos flocos e ainda o grau de agregação de água (FREIRE et al., 1997; PARSAPOUR et al., 2014) mostram-se de grande importância para a condução eficiente dessas operações de desaguamento e produção das pastas minerais, que têm especial importância com relação à forma mais segura e ambientalmente mais amigável de deposição de rejeitos da mineração, eliminando a necessidade das barragens de rejeitos convencionais.

2.4 | Minimização no Uso de Barragens de Rejeitos Convencionais

Considerando os cenários nacional e internacional, bem como o aumento previsto para a demanda mundial por insumos minerais, a quantidade de rejeito produzida será sempre crescente, assim como a necessidade de expansão das estruturas de armazenamento/disposição. Ao mesmo tempo, cresce a frequência dos acidentes ocorridos com as barragens, o que desperta a atenção da comunidade técnico-científica e Governo para a questão da segurança dessas obras e sua

operação (SOARES, 2010). Entre os anos de 2000 e 2017 ocorreram no mundo sete grandes acidentes com barragens, com vítimas fatais; três deles no Brasil (ÁVILA, 2013; ROCHE et al., 2017).

No Brasil, em abril de 2014, havia 663 barragens de rejeito de mineração cadastradas no Departamento Nacional da Produção Mineral (ANASTASIA e FERRAÇO, 2015); porém, 40% delas não estão inseridas no Plano Nacional de Mineração de Segurança em Barragens - PNSB.

Estudiosos e especialistas em construção e monitoramento de barragens (FREIRE NETO, 2009; ROBERTSON, 2013; ÁVILA, 2015; SOARES e BOSCOV, 2018) apontam para a necessidade de modificação no processo de produção dos rejeitos, destacando que:

- i) a redução do teor de umidade dos rejeitos para disposição com baixo grau de saturação é o processo mais promissor para redução de riscos a custos administráveis;
- ii) para rejeitos compostos por partículas muito finas, a retirada de água por espessamento e filtragem possibilita a disposição com baixo grau de saturação;
- iii) 47% dos acidentes ocorridos com barragens tiveram como causa principal a liquefação, que é a perda de resistência com a deformação, gerada, principalmente, devido à presença de água na massa de rejeito.

Larrauri e Lau (2018) apresentaram um modelo estatístico para estimar o volume de rejeito e distância máxima percorrida pelo mesmo, em casos de falhas em barragem de rejeitos; esse tipo de previsão deve levar em conta as características reológicas do rejeito, as quais são fortemente relacionadas à quantidade de água contida nos mesmos.

A produção de rejeitos pastosos e não saturados leva à possibilidade de empilhamento dos mesmos, adotando-se a forma seca de disposição, minimizando a necessidade de barragens de rejeitos convencionais. A vantagem desse tipo de disposição vai além da segurança, atingindo, especialmente, a maximização na recuperação da água contida nos rejeitos.

2.5 | Espessamento e Filtragem para Produção de Rejeitos Desaguados

A redução do consumo de água nas atividades de mineração pode ter como ponto de partida o gerenciamento dos rejeitos gerados. A disposição de rejeitos em forma de pastas apresenta grandes vantagens em relação às barragens de rejeito (CHAVES et al., 2013):

- i) menores volumes dispostos, pois o material contém menor quantidade de água;
- ii) as pastas são dispostas em forma de cone, o que permite o escoamento da água das chuvas sobre o mesmo e apenas um pequeno percentual de infiltração.

O desaguamento dos rejeitos minerais é a principal etapa para a produção das pastas minerais. Os equipamentos mais utilizados são espessadores de alta capacidade, especialmente os *deep cone thickeners* e os espessadores de pastas, que apresentam uma configuração estrutural diferenciada, com maior altura da zona de clarificação e fundo mais inclinado, permitindo que a camada de líquido exerça maior pressão sobre os sólidos sedimentados, auxiliando na produção de um *underflow* compactado e de maior densidade (pasta), diferente dos espessadores convencionais.

Um estudo desenvolvido por Davies (2011) aponta que existem mais unidades de produção e deposição de rejeitos filtrados - deposição a seco - do que unidades de pastas minerais. Porém, a divulgação de formalidades e procedimentos operacionais para as últimas é muito mais intensa. Entretanto, em termos de custos de capital e operacional, as barragens de rejeitos convencionais ainda são a melhor alternativa para grande parte das operações de processamento de minérios ao redor do mundo.

Com o desenvolvimento e melhoria de tecnologias de desaguamento, a polpa de rejeito é vista como um material intermediário na produção de rejeitos espessados ou pastosos. Equipamentos como centrífugas, espessadores de pasta, filtros cerâmicos e a vácuo de maior capacidade, além de novas tecnologias para filtros prensa e sob pressão, surgem como alternativas para a deposição de rejeitos no estado não saturado, com percentagem de sólidos de 70 a 85% (FRITZKE e CAVALLI, 2018; KLUG et al., 2018; WILLIAMS et al., 2017; GUIMARÃES, 2011; OSORIO et al., 2008; FIGUEIREDO, 2007; JOHNSON et al., 2005).

3 | REJEITOS DA MINERAÇÃO

As características dos rejeitos minerais, como sua granulometria e forma das partículas, variam de acordo com sua procedência, ou seja, com o tipo de tratamento aplicado na usina de beneficiamento, e com o próprio mineral de interesse ao qual está interligado (ESPÓSITO, 2000). De forma geral, os rejeitos com granulometria fina, denominados lamas, apresentam elevada compressibilidade e plasticidade, e são de difícil sedimentação, requerendo o uso de floculantes para aumentar a velocidade de sedimentação. Por outro lado, os rejeitos granulares detêm elevada permeabilidade e resistência ao cisalhamento.

A disposição desses rejeitos pode ser realizada em superfície ou de forma subterrânea. Porém, convencionalmente, eles são dispostos como polpas em barragens, que são construções para conter os rejeitos minerais, funcionando como salvaguardas ambientais (FALCUCCI e PERES, 2010; SOARES, 2010).

3.1 | Rejeitos em Forma de Polpa

As polpas de rejeito mineral podem ser descritas como uma mistura sólido-líquido, passível de segregação, devido ao baixo teor de sólidos. A disposição desses rejeitos, na forma de polpas, em barragens convencionais, apresenta riscos físicos ao meio ambiente, podendo ocasionar perdas econômicas, sociais e ambientais significativas no entorno, no caso de eventuais rompimentos de barragens.

Os rejeitos em polpa são, de maneira geral, tratados com reagentes químicos – na maioria das vezes cal (suspensão aquosa de CaO) – para neutralização de acidez e remoção de metais pesados para, então, serem bombeados para a barragem de rejeitos. Na barragem ocorre a sedimentação do material sólido e a água sobrenadante é, então, bombeada de volta para a usina de processamento mineral. Esse procedimento reduz a quantidade de água e poluentes na barragem de rejeitos e, também, a necessidade de captação de água nova para o processo (WILLS e FINCH, 2016). O excesso de água na barragem de rejeitos pode provocar danos operacionais e estruturais, sendo uma variável que carece extremo controle.

Convencionalmente, os rejeitos produzidos encontram-se como polpas, que são suspensões minerais, havendo a necessidade de operações de separação sólido-líquido, para que a fase líquida retorne ao processo, e o rejeito mais adensado, mais concentrado, bombeado para disposição. Assim sendo, de forma geral, a inserção desses rejeitos no meio ambiente pode ser dividida envolvendo, basicamente, duas etapas: primeiramente, o rejeito é separado da corrente de processo e acumulado em tanques de sedimentação, no qual ocorre a aplicação de flocculantes para separar o líquido clarificado (*overflow*) da fase de concentrados minerais (*underflow*), e na segunda etapa, essa lama de rejeitos é transportada para seu local de deposição (NGUYEN e BOGER, 1998).

Os rejeitos, na forma de polpas, são transportados por meio de tubulações, podendo haver estações de bombeamento, ou pelo uso da gravidade. Segundo Soares e Boscov (2018), tais

metodologias são definidas levando em consideração a distância e a elevação relativa entre a usina de beneficiamento e o local de deposição do rejeito.

O método de disposição convencional dos rejeitos minerais, como polpas em barragens, está associado a muitos problemas operacionais, como, por exemplo, a obstrução da tubulação, pois como as polpas contêm elevada quantidade de água livre, é pertinente manter o fluxo de rejeito com velocidade acima da mínima necessária para que não ocorra sedimentação das partículas sólidas e a consequente obstrução da tubulação (FALCUCCI e PERES, 2010; SOFRÁ e BOGER, 2002).

Nas barragens convencionais, observa-se também, a questão da segregação hidráulica ou segregação granulométrica, que é o processo de disposição das partículas em função da sua granulometria e distância em relação ao ponto de lançamento. Tal fenômeno é observado porque as polpas são fluidos heterogêneos, devido a grande quantidade de água livre, ocorrendo a sedimentação dos rejeitos granulares na região próxima ao ponto de lançamento, enquanto que os rejeitos finos sedimentam nas áreas mais distantes da descarga. Dessa forma, tem-se uma região de alta permeabilidade próxima à descarga em oposição a uma de baixa permeabilidade nas zonas afastadas (BOGER, 2013; ESPÓSITO, 2000; NGUYEN e BOGER, 1998).

Diante disso, as barragens convencionais (Figura 7) apresentam muitos problemas de instabilidade, fugas e liquefação, sendo crucial a implantação de novas técnicas de disposição dos rejeitos minerais desaguados.



Fonte: Autor.

Figura 7. Disposição de rejeito de níquel em polpa, em barragem convencional (Minas Gerais, Brasil).

3.2 | Rejeitos Adensados e Pastas Minerais

Segundo Boger (2013), o introdutor do conceito de remover a água de rejeitos antes da sua deposição foi o professor Eli Robinsky, que colocou essa metodologia em prática no Canadá em 1973 e, desde então, essa técnica vem apresentando sucesso e sendo adotada pela indústria.

A principal diferença entre as duas abordagens – rejeitos em polpa e rejeitos desaguados ou adensados (em forma de pasta ou tortas de filtração) – é que no método de disposição convencional a polpa de rejeito é bombeada em regime turbulento para a barragem, onde ocorre a segregação e sedimentação das partículas, formando uma superfície plana

(Figura 7). Para a disposição na forma de pastas minerais, a polpa é previamente adensada, até atingir uma consistência homogênea, levando a um fluxo laminar sem segregação granulométrica das partículas (FALCUCCI e PERES, 2010), como apresentado na Figura 8. Portanto, o comportamento reológico de rejeitos em polpa e em pasta é completamente distinto, o que pode ser evidenciado pela comparação das Figura 7 e 8.



Fonte: Slottee et al. (2005).

Figura 8. Disposição de rejeito de minério de ferro em pasta.

Segundo Boger (2013), a deposição do rejeito mineral na forma de pastas apresenta muitas vantagens, como:

- i) reutilização da água no processo de mineração;
- ii) maximiza a densidade dos rejeitos, facilitando seu armazenamento;
- iii) minimiza a área necessária para estoque da lama;

- iv) torna o resíduo adequado para o preenchimento (*backfill*) de minas;
- v) reduz a necessidade de drenagem;
- vi) menor probabilidade de contaminação das águas subterrâneas;
- vii) redução do risco de falhas nas barragens.

O desafio dessa metodologia está na produção, manuseio e transporte dessa pasta com elevada concentração de sólidos utilizando o mínimo de custo e o máximo de eficiência possível, e em realizar uma descarga desse material de forma a permitir um bom espalhamento sobre a superfície de deposição, a fim de possibilitar eficiente consolidação. Assim sendo, o sucesso dessa técnica está na operação de desaguamento e na exploração e compreensão da reologia desses rejeitos.

A produção de rejeitos espessados, ou de alta densidade, é baseada na remoção de água da polpa. A disposição de rejeitos espessados tem se mostrado como uma alternativa viável e necessária para disposição dos rejeitos gerados nas minerações, uma vez que minimiza os potenciais riscos inerentes à disposição de rejeitos, em forma de polpa, nas barragens convencionais e/ou o grande impacto ambiental causado pelas barragens, especialmente no caso de eventuais rupturas (PORTES, 2013).

A tecnologia de produção de rejeitos adensados e pastosos pode ser aplicada para reduzir os riscos e possíveis impactos inerentes à disposição de rejeitos em polpa (disposição hidráulica) e promover melhorias na eficiência de estocagem dos rejeitos industriais. Além disso, a técnica de adensamento possibilita maior recuperação e reuso de água de processo

(JOHNSON et al., 2005; OSORIO, 2007). Outras vantagens da disposição de rejeitos adensados também são citadas por Sofrá e Boger (2002), a saber: maiores ângulos de repouso, menores custos de investimento e de operação, menor impacto ambiental.

Embora a disposição de rejeitos espessados já seja bastante conhecida e aplicada internacionalmente, no Brasil o seu uso ainda é bastante incipiente. Entretanto, Portes (2013) relata que países como Austrália, Canadá e Peru já utilizam esta técnica de disposição de forma exitosa e eficiente, promovendo ganho ambiental durante a operação industrial, redução de custos no descomissionamento e recuperação de água de processo. Adicionalmente, a tecnologia de rejeitos espessados tem se apresentado como um método eficaz de disposição de rejeitos, no que se refere à segurança das estruturas formadas por estes materiais.

A pasta mineral pode ser definida como um sistema coloidal, que se apresenta como um fluido homogêneo, no qual não ocorre segregação granulométrica das partículas, e que ao ser disposta suavemente sobre superfícies estáveis, não mostra drenagem significativa de água (OSORIO et al., 2008).

Para o transporte e disposição das pastas minerais, deve-se analisar as suas propriedades reológicas, como tensão de escoamento e, principalmente, a altura de abatimento, que reflete a deformação sofrida pela pasta quando submetida a diferentes esforços. Essa variável é fortemente dependente da concentração de sólidos (REZENDE NETO et al., 2015).

3.3 | Rejeitos Filtrados

A filtragem é uma operação unitária de separação sólido-líquido, que ocorre por meio da ação de uma força incidente sobre as partículas, podendo ocorrer por meio da gravidade, vácuo, pressão ou centrifugação. A operação de filtragem utiliza um meio filtrante para reter as partículas sólidas (torta) presentes na mistura e permite a percolação do líquido (filtrado).

As particularidades de uma torta de filtração estão relacionadas à concentração de sólidos, estado de agregação das partículas e porosidade do meio e, especialmente, a quantidade de água residual. Essas características terão grande influência na estabilidade de instalações de disposição de rejeitos.

A disposição dos rejeitos em pilhas pode ser uma alternativa viável. A polpa, previamente adensada, seria filtrada e a torta produzida seria disposta em pilhas (em separado, em mistura ou em co-disposição com o estéril da mina). A filtragem dos rejeitos proporciona, também, o aumento da recuperação de água de processo da usina, reduzindo o consumo de água nova. Além da dificuldade de licenciamento de barragens, existe, também, uma dificuldade adicional nos novos projetos de aquisição de outorga para direito de uso de recurso hídrico.

A filtragem de rejeitos é uma prática usual em regiões cuja escassez de água é um fator limitante ao desenvolvimento da atividade mineral. As operações de desaguamento são conduzidas de maneira eficiente nas minerações do deserto do Atacama, norte do Chile, com o intuito de minimizar as perdas e maximizar o reuso de água de processo. Como exemplo tem-se a mina de ouro de La Coipa, na região de Copiapó, onde todo o rejeito do beneficiamento é filtrado e transportado

por correia transportadora até a área de empilhamento, promovendo a recuperação de maior parte da água contida no mesmo.

Guimarães et al. (2012) estudaram a filtragem de rejeitos de minério de ferro e mostraram que é possível desaguar os rejeitos com uma boa taxa de filtragem e produzir tortas com umidade adequada para empilhamento, desde que não haja grande quantidade de lamas na composição dos rejeitos. A filtragem das lamas sob pressão resultou em taxa unitária de filtragem relativamente baixa e alta umidade da torta (próximo a 20%), certamente devido à maior dificuldade em expulsar a água contida nos poros e canais de menor dimensão de um meio poroso formado por partículas muito finas. Os autores sugerem que a torta derivada das lamas seja misturada à torta de rejeitos grossos e/ou ao estéril da mina, para permitir o seu empilhamento; contudo, haverá a necessidade de estudos geotécnicos complementares, que comprovem a viabilidade da operação.

Williams et al. (2017) apresentaram uma abordagem financeira comparativa entre a disposição de rejeitos em forma de polpa (barragens convencionais) e rejeitos filtrados, mostrando que os custos com instalação e operação de unidades de desaguamento (espessadores e filtros) tornam-se menores, diante das vantagens obtidas com a disposição de rejeitos filtrados. Os autores apresentam estudos de caso de empresas de mineração da Austrália e dos Estados Unidos, que apostaram na nova metodologia e logram êxito na sua aplicação (Tabela 1), inclusive com a possibilidade de agregação de valor ao rejeito desagüado.

Tabela 1. Exemplos de ganhos no uso da tecnologia de disposição de rejeitos filtrados.

Localização	Problema/desafio	Solução e ganhos
Centro da Califórnia (EUA)	limitações na área de estocagem de rejeitos, devido às proximidades com a área urbana.	instalação de unidade de recuperação de ultrafinos; matéria-prima para composição de solo argiloso.
Wisconsin, EUA (área de fraturamento hidráulico)	transporte de rejeitos por vias públicas, sem vazamentos, para disposição em áreas remotas.	uso de polímeros e filtragem em filtros de pressão; licença social do empreendimento.
Indiana, EUA (carvão mineral)	limitações na área de estocagem de rejeitos	produção de rejeito seco (torta) para misturar com o rejeito grosso úmido; redução de volume de rejeito e aumento da vida útil da barragem.
Victoria, Austrália (Agregados para a construção civil)	limitações na área de estocagem de rejeitos	produção de rejeito seco (torta); matéria-prima para uso na construção civil.

Fonte: Williams et al. (2017).

Os autores concluíram o trabalho com a afirmação de que o incentivo aos investimentos na nova tecnologia foi baseado na eliminação do armazenamento de rejeitos em polpa, redução dos custos de operação e manutenção das barragens convencionais, recirculação de maior volume de água para a planta de beneficiamento, além do atendimento às normas ambientais locais, cada vez mais rigorosas, que levaram à obtenção da licença social.

Em estudo recente, Fritzke (2018) apresenta a filtragem, em filtros prensa de grande capacidade, para o desaguamento de lama vermelha e produção de tortas com 18% de umidade, para disposição a seco (*dry stacking*).

Olmedo et al. (2015) compilaram informações relevantes sobre os tipos de disposição dos rejeitos e suas características mais importantes (Tabela 2), permitindo a avaliação de eficiência dos mesmos do ponto de vista da sustentabilidade (social, econômica e ambiental).

Tabela 2. Comparação operacional entre barragens de rejeitos convencionais e de disposição em pastas e/ou a seco.

Características/Tipo de disposição	Barragens convencionais	Disposição em pasta ou filtrado
Volume de rejeito	grande, com 25-30% de sólidos	1/6 do convencional, com >60% sólidos
Presença de água	mais de 50% (p/p)	cerca de 10-30% (p/p)
Disposição de água	requer dique de contenção de água	requer apenas área de empilhamento
Recuperação de água	pequena; perdas por evaporação e infiltração (indesejada)	elevada; água recuperada na planta, antes da disposição
Contaminação de aquíferos	possível	baixa ou nula
Densidade final do rejeito	baixa	alta
Riscos de liquefação na barragem	possível a alta	baixo ou mínimo
Risco de falha da barragem	alto	baixo ou mínimo
Uso da terra após o fechamento da mina	difícil recuperação da área	passível de recuperação e reuso

Fonte: adaptado de Portes (2013); Olmedo et al. (2015).

4 | CARACTERIZAÇÃO REOLÓGICA DE REJEITOS MINERAIS

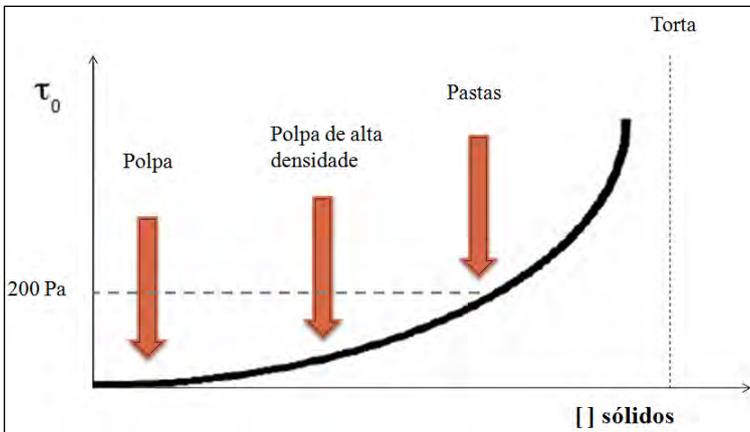
4.1 | Tensão de Escoamento

A tensão limite de escoamento (*yield stress*), τ_0 , é a tensão mínima necessária para que o fluido se deforme plasticamente, ou seja, escoe. Inicialmente, o material se comporta como um sólido e ao atingir determinada tensão de cisalhamento (τ_0) ocorre a primeira evidência de escoamento, como pode ser observado quando manuseia-se ketchup ou pasta de dente. Esse comportamento é característico dos materiais classificados como fluidos não newtonianos, como é o caso das pastas minerais (BOGER, 2013).

Os rejeitos da mineração na forma de polpas possuem baixa concentração de sólidos, apresentando o comportamento característico de um fluido newtoniano, ou seja, a viscosidade independe da taxa de cisalhamento aplicada, exibindo uma relação linear entre a taxa e a tensão cisalhante. No entanto, com o aumento da concentração de sólidos e a polpa é, então, adensada para formar as pastas, ocorre alteração das características do rejeito, que passa a exibir um comportamento não newtoniano, com tensão limite de escoamento. Assim, mediante a caracterização reológica das suspensões minerais, é possível estabelecer a transição entre polpas, pastas e torta, como ilustrado na Figura 9 (BOGER, 2013; SOFRÁ e BOGER, 2002).

As características das pastas, como homogeneidade, elevada viscosidade e presença de mínima quantidade de água livre, fazem com que o material adensado seja bem coeso, sendo caracterizado com a particularidade de apresentar tensão de

escoamento mínima de 200 Pa. Esse valor elevado de tensão de escoamento dificilmente é alcançado com o uso, apenas, de polímeros flocculantes, fazendo-se necessária, na maioria dos casos, a adição de cimento. Devido a esse fato, diversos autores consideram como sedimento pastoso aquele que apresenta tensão limite de escoamento mínima de 100 Pa (BOGER, 2013; FITTON e SEDDON, 2013), inclusive para efeitos de operação de equipamentos industriais (AI-XIANG et al., 2012; OLMEDO et al., 2015).



Fonte: Autor, adaptado de Falcucci e Peres (2010).

Figura 9. Transição entre polpas, pastas e tortas, levando em consideração a análise reológica e a tensão limite de escoamento.

O monitoramento da tensão limite de escoamento é essencial para garantir a disposição dos rejeitos na forma de pastas, além de ser de extrema importância para o dimensionamento das bombas e tubulações, a fim de evitar problemas como a obstrução de linhas de descarga e a utilização de bombas que não alcançam a tensão mínima necessária para garantir o escoamento.

A tensão limite de escoamento, estimada a partir da caracterização reológica das polpas minerais, é a principal característica de uma pasta e, normalmente, é expressa em função da concentração de sólidos, apresentando um crescimento exponencial, ou seja, pequenas modificações na concentração promovem alterações sensíveis na tensão de escoamento. No entanto, não existe uma concentração de sólidos mínima específica para que se tenha o comportamento de pasta, pois as características reológicas de uma polpa ou pasta podem ser influenciadas por um amplo número de variáveis, abrangendo desde a interferência de variáveis hidrodinâmicas até as provenientes dos fenômenos interfaciais.

As polpas minerais possuem características próprias, ou seja, um sistema é diferente do outro, uma vez que essas características dependem de propriedades como tamanho e forma das partículas, distribuição granulométrica, concentração e superfície química. A inter-relação desses diferentes fatores deve ser estudada e bem compreendida, para que seja utilizada em prol do aumento das forças atrativas entre as partículas, e, por conseguinte, na formação de sedimentos mais coesos. Esses sedimentos necessitam de valores elevados de tensão de cisalhamento para promover o rompimento das forças de coesão e consequente escoamento, devido ao seu caráter pastoso (SOFRÁ e BOGER, 2002; FERREIRA et. al., 2005; FALCUCCI e PERES, 2010; BOGER, 2013).

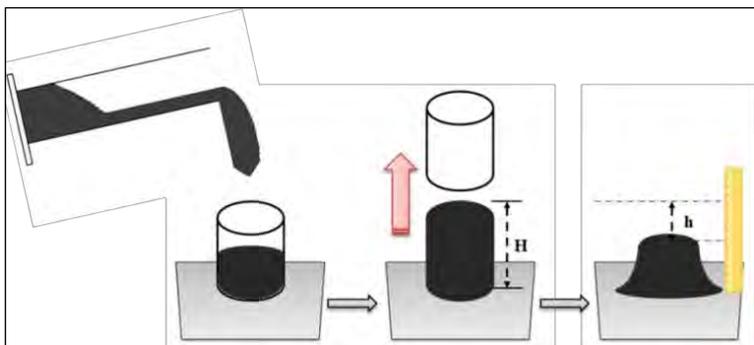
4.2 | Teste de Abatimento - *Slump Test*

O teste de abatimento é padronizado pela ASTM (1998), sendo originalmente utilizado na determinação da consistência do concreto, a fim de estabelecer o grau de facilidade do manuseio. No entanto, essa técnica vem sendo amplamente utilizada na determinação da consistência de rejeitos minerais para as operações de disposição (CLAYTON; GRICE e BOGER, 2003; BOGER, 2013).

A consistência do material é uma medida relativa, dada pela diferença entre as alturas do sedimento confinado em um recipiente e após a remoção vertical do mesmo (Figura 10), conhecida como altura de abatimento. Quanto menos consistente for o material, maior será a altura de abatimento, indicando maior facilidade de escoamento.

A norma padrão para o teste de abatimento, descreve que o procedimento deve ser realizado em um cone cujo raio da base é o dobro do topo. No entanto, diferentes estudos relatam que essa técnica pode ser modificada, sendo aplicada para geometria cilíndrica, inclusive a pequenos cilindros, de forma a facilitar os ensaios realizados em escala de laboratório, e utilizada para avaliar a consistência de suspensões minerais (PASHIAS e BOGER, 1996; CLAYTON, GRICE e BOGER, 2003; BOGER, 2009; MIZANI e SIMMS, 2016). Segundo Clayton, Grice e Boger (2002), a utilização da geometria cilíndrica permite procedimentos mais simples, baratos e precisos.

No procedimento experimental apresentado na Figura 10, um cilindro (de altura H) é preenchido com o sedimento e removido verticalmente. Mede-se a altura final do sedimento, após a remoção do cilindro; a diferença entre as duas alturas medidas (h) é a altura de abatimento.



Fonte: Autor.

Figura 10. Esquema para o teste de abatimento com cilindro.

O controle da consistência do sedimento é extremamente complexo, pois está diretamente relacionado à tensão limite de escoamento, que depende das características do sedimento como teor de sólidos, tamanho de partícula e propriedades químicas e de superfície.

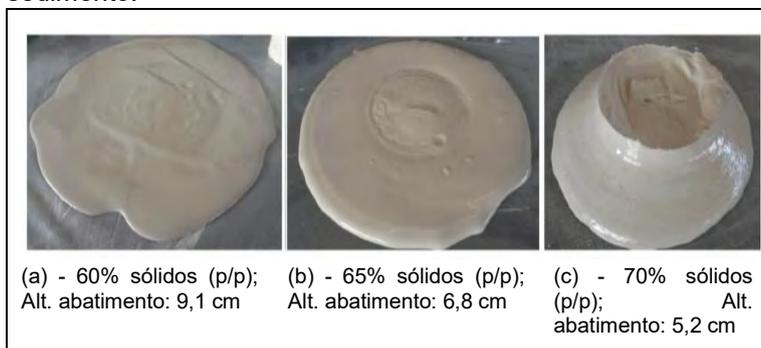
De acordo com a literatura, numerosos estudos comparam a medida empírica da altura de abatimento com a tensão limite de escoamento. Dessa forma, vêm sendo desenvolvidos modelos matemáticos a fim de relacionar a altura de abatimento com a tensão limite de escoamento e, assim, determinar, de maneira mais simples, o comportamento reológico do sedimento (CLAYTON; GRICE e BOGER, 2003; BOGER, 2013).

4.3 | Exemplos Práticos de Produção de Rejeitos Espessados, Pastas Minerais e Rejeitos Filtrados em Laboratório

Nessa sessão serão apresentados alguns trabalhos experimentais de produção de rejeitos desaguados, para disposição alternativa. As metodologias são diversificadas, com foco no uso de reagentes para agregação de partículas, equipamentos ou outras modificações operacionais.

Rezende Neto et al. (2015) estudaram a produção de pastas minerais para rejeitos fosfáticos, com avaliação da influência de diferentes flocculantes no processo de agregação de partículas e sedimentação do rejeito pastoso, além da influência desses reagentes na qualidade da água recuperada, em termos de turbidez residual.

Na Figura 11 são apresentados os resultados de teste de abatimento (*slump test*) obtidos por Rezende Neto et al. (2015), sob o aspecto de consistência dos rejeitos pastosos produzidos em diferentes condições operacionais. É possível perceber a forte influência do teor de sólidos na estrutura final do sedimento.

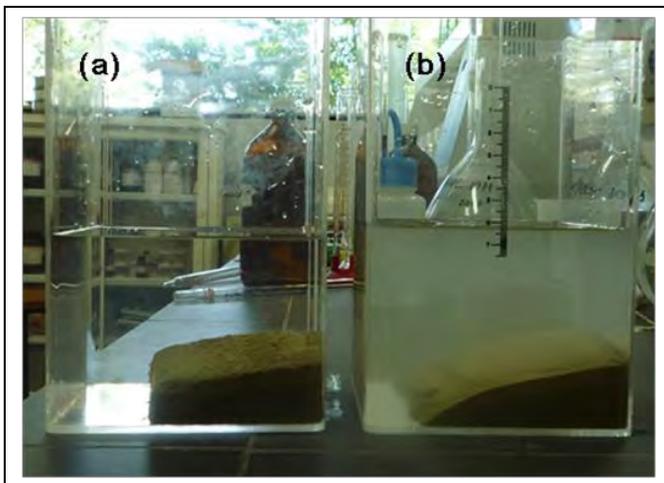


Fonte: Rezende Neto et al. (2015).

Figura 11. Alturas de abatimento de pastas minerais de rejeito fosfático em função do teor de sólidos.

Estudos de desaguamento também foram realizados com rejeito de níquel. Andrade (2015), Loayza (2015) e Carvalho et al. (2016) estudaram a influência do peso molecular de polímeros floculantes na agregação de partículas para desaguamento. Gonçalves et al. (2016) e Gadelha e França (2016) avaliaram a correlação entre o peso molecular do polímero e a pressão de operação de filtros, na produção de rejeitos filtrados e recuperação de água de processo.

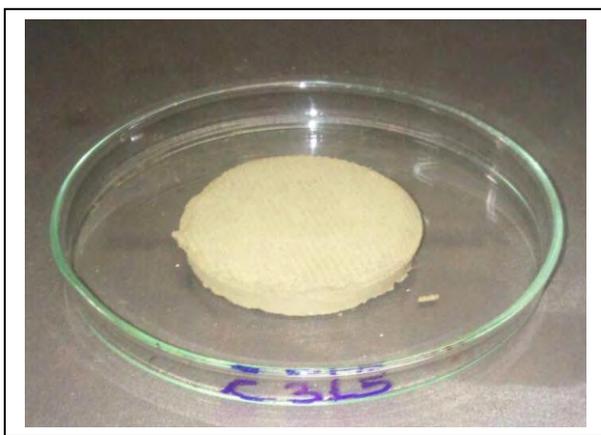
Na Figura 12 são apresentados os aspectos de sedimentos de níquel adensados com polímeros de diferentes pesos moleculares, mostrando turbidez residual do sobrenadante e estrutura menos coesa do sedimento produzido com polímero de menor peso molecular (b).



Fonte: Andrade (2015).

Figura 12. Aspecto estrutural de rejeitos adensados de níquel (inclinação a 45° por 24 h) e turbidez do líquido sobrenadante, para polímeros floculantes de diferentes pesos moleculares: (a) $Mv=2,1 \times 10^7$ g/mol (b) $Mv=7,0 \times 10^6$ g/mol.

Entretanto, para a produção de rejeitos filtrados, o polímero de menor peso molecular, por ter menor viscosidade e por formar flocos de estrutura menos fechada, permite maior liberação de água e, conseqüentemente, produz tortas de filtração com menor umidade (Figura 13).



Fonte: Andrade (2015).

Figura 13. Torta de rejeito de níquel filtrado, com 9,8% de umidade.

Trampus e França (2017) também avaliaram o efeito do teor de sólidos na estabilidade e consistência de sedimentos adensados de lama vermelha, por meio da avaliação de propriedades reológicas. A amostra de lama vermelha estudada tem como característica granulométrica $d_{50}=5,7 \mu\text{m}$ e $P_{80}=17 \mu\text{m}$). Pelas fotografias apresentadas na Figura 14 é possível observar a perda de fluidez do sedimento, à medida que se aumenta a concentração de sólidos; essa influência é traduzida pelos valores de tensão de escoamento estática e dinâmica, que são propriedades reológicas de grande importância na caracterização de rejeitos adensados e pastas minerais.

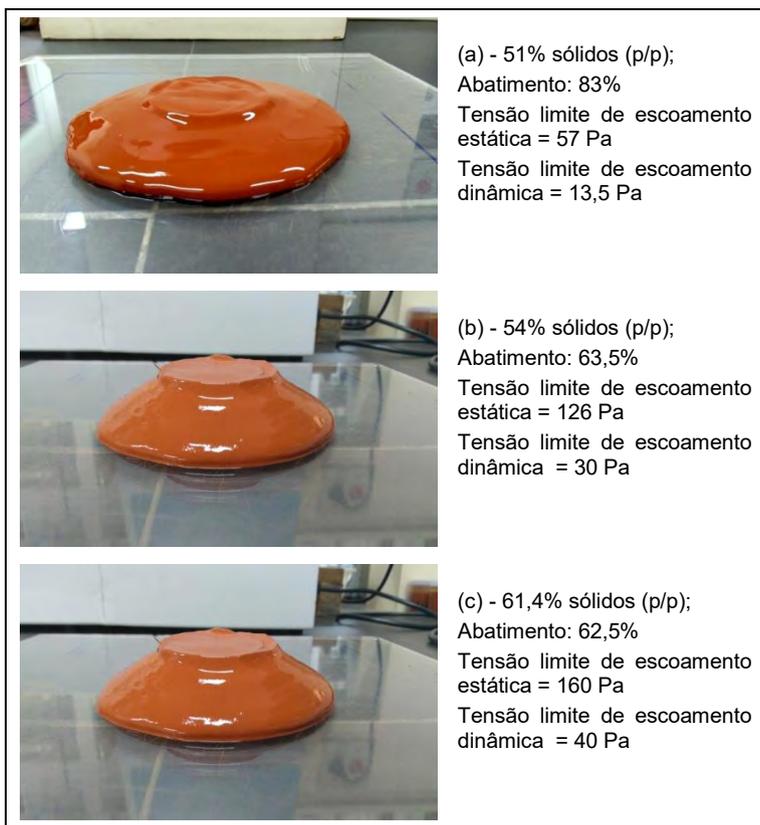


Figura 14. Influência do teor de sólidos no abatimento e na tensão de escoamento de sedimentos adensados.

Em termos de desenvolvimento tecnológico e aplicação da produção de rejeitos adensados e filtrados e novos métodos de disposição, vale ressaltar a diversidade de trabalhos desenvolvidos por instituições de PD&I e empresas de mineração do Brasil. Esse esforço visa buscar melhor compreensão e domínio dos fenômenos e condições operacionais envolvidos na produção e disposição de rejeitos

minerais de alta densidade e filtrados, que se apresenta como uma necessidade para a sustentabilidade da atividade mineral. A seguir são citados alguns trabalhos de grupos de pesquisa que estão colaborando para a disseminação do conhecimento no tema:

- **Contribuição ao estudo do comportamento de barragens de rejeito de mineração de ferro** (Araujo, C.B.), Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2006;
- **Seleção de locais para barragens de rejeito usando o método de análise hierárquica** (Lozano, F.A.E.). Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, 2006;
- **Estudo de metodologias alternativas de disposição de rejeitos para a mineração Casa de Pedra, Congonhas/MG** (Figueiredo, M.M.), Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto, 2007.
- **Efeito da adição de reagentes agregantes e de ligantes sobre a consistência em pastas minerais** (Osorio, C.A.H.), Tese de Doutorado, Universidade Federal de Minas Gerais, 2007.
- **Espessamento e transporte de pasta mineral** (De Lara, A.F.M.), Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, 2011.
- **Filragem de rejeitos de minério de ferro visando a sua disposição em pilhas** (Guimarães, N.C.). Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, 2011.

- **Desaguamento de polpas minerais floculadas para a disposição a seco** (Andrade, L.S.) Monografia (Graduação), Universidade Federal do Rio de Janeiro/Centro de Tecnologia Mineral, 2016.
- **Riscos da disposição de rejeitos da mineração e técnicas alternativas de disposição** (Rodrigues, A.B.) Monografia (Graduação), Universidade Federal de Ouro Preto, 2017.

5 | NOVAS ABORDAGENS NA DISPOSIÇÃO DE REJEITOS MINERAIS

Há uma nova tendência sendo estabelecida para a tomada de decisão quanto à forma da disposição dos rejeitos de uma mina e usina de beneficiamento mineral, já com foco no encerramento das operações de mina. Thompson e Moreno (2017) abordam os desafios relacionados à transição entre a operação e o fechamento de uma mina, no que diz respeito às áreas de disposição de rejeitos (*tailing storage facilities - TSF*), principalmente com relação à segurança dessas instalações de armazenamento.

É sabido que as instalações de armazenamento de rejeito não atingem níveis de consolidação e estabilidade, ao mesmo tempo em que as operações de lavra e beneficiamento são encerradas; esse descompasso acarreta custos adicionais e atrasos no processo de descomissionamento das instalações industriais. Nesses casos, deve-se lançar mão dos benefícios das operações de desaguamento para produção de rejeitos espessados, de alta densidade e/ou pastas, para avaliar a viabilidade da sua utilização, como estratégia para o futuro encerramento das atividades minerárias.

As vantagens são identificadas não apenas na maior segurança no armazenamento dos rejeitos, mas também no aumento da capacidade de recuperação de água de processo. Além disso, a produção de rejeitos espessados pode ser inserida na concepção de novos projetos, bem como em empreendimentos em operação. Thompson e Moreno (2017) citam alguns exemplos de mineradoras que estão adotando a estratégia de mudança na produção dos rejeitos, com foco no descomissionamento, as quais serão abordadas a seguir.

Na Austrália, duas minerações de ouro, a Tamini e a Union Reef, incorporaram a disposição de rejeitos espessados aos seus processos industriais, visando modificar o relevo das TSF's, para minimizar as atividades e custos de terraplenagem e reabilitação, necessárias para o fechamento das instalações.

Na África do Sul, a Kimberley Diamond Mines adotou a disposição de rejeitos espessados na reabilitação de antigas barragens de lamas, com o objetivo de maximizar a capacidade de armazenamento de rejeitos, além de promover a adequação do relevo e da estrutura desses rejeitos às exigências para o futuro fechamento. De maneira geral, os benefícios gerados pela produção de rejeitos espessados superaram os custos com as alterações nas operações de desaguamento (aquisição de espessador e de bomba de deslocamento positivo para o rejeito de alta densidade). O aumento na recuperação de água de processo, especialmente em regiões de baixos índices pluviométricos, é considerado um ganho importante, em termos econômicos e ambientais.

Em Gana, a Prestea Gold Mine implementou a produção de rejeitos espessados, com descarga central através de uma plataforma elevada no centro da barragem de rejeito convencional, com o objetivo de aumentar a vida útil da barragem, até o fechamento da mina.

No México, o exemplo de modificação na disposição dos rejeitos vem da mineração de ferro Peña Colorada, que está em processo de comissionamento de um espessador para produção de rejeitos adensados, em substituição à deposição convencional, em operação. O objetivo da mudança é reduzir a quantidade de água enviada para a barragem, além de aumentar a inclinação da praia da barragem, para maximizar a

estocagem de rejeitos. As mudanças operacionais foram estimuladas pela alta sismicidade da área e pela crescente taxa de produção e deposição dos rejeitos convencionais, estando sujeitos a eventos sísmicos.

Embora a mudança na abordagem da disposição dos rejeitos vise sempre a maximização do uso da área da barragem, além do aumento da sua segurança e da recuperação de água de processo, sempre haverá a necessidade de avaliação de riscos da nova forma de disposição, além da adequação à tecnologia de disposição já existente. Conforme enfatizam Thompson e Moreno (2017), além de outros estudiosos do assunto (FITTON e SEDDON, 2013; CELLA, 2017), é importante entender as condições específicas do local e o histórico operacional das instalações de estocagem de rejeito, para que a estrutura do terreno seja adequada ao novo modo de disposição e para que os impactos decorrentes de uma mudança no projeto sejam conhecidos, minimizados e monitorados ao longo do tempo de operação até o fechamento da mina.

Sobkovicz (2013) abordou o problema da disposição de rejeitos líquidos produzidos por mineradoras de areia betuminosa da região de Alberta, no Canadá. No setor de mineração de areias betuminosas, os rejeitos finos líquidos apresentam teor inicial de sólidos na faixa de 15 a 20% (p/p) e proporção areia:finos menor do que 1; as partículas finas permanecem em estado altamente disperso nas bacias de rejeitos, provavelmente devido à presença de agentes dispersantes, que foram previamente adicionados ao processo, para otimizar a recuperação do betume do minério.

As partículas de argila, silte e areia fina sedimentam ao longo do tempo (vários anos), formando os rejeitos finos maduros, cujo teor de sólidos é na faixa de 30 a 35% e proporção areia:finos de 0,1. Devido à sua característica estrutural (partículas menores que 44 μm), o rejeito fino maduro continua estável por dezenas de anos, com pouca probabilidade de consolidação. Entretanto, para atender às normas ambientais locais, os rejeitos líquidos devem ser drenados de forma significativa. Os rejeitos finos maduros, por exemplo, devem apresentar aumento do teor de sólidos de 35% a aproximadamente 75% para atingirem resistência ao cisalhamento remoldada e não drenada de 5 a 10 kPa. Isso representa uma perda aproximada de 80% de seu volume de água original e 70% de seu volume total original.

Atualmente não há tecnologia de tratamento de rejeitos disponível para produzir essa quantidade de desaguamento de uma só vez. As tecnologias disponíveis, incorporando um ou dois estágios de desaguamento, conseguem drenar rejeitos finos maduros até chegar a uma pasta com teor de sólidos de 60 a 65% e resistência ao cisalhamento remoldada não drenada de 500 a 1000 Pa.

O setor encara dificuldades tecnológicas na recuperação das bacias de rejeitos, devido às limitações operacionais de sedimentação dos finos e separação sólido-líquido; dessa forma, torna-se difícil a estruturação de depósitos com estabilidade geotécnica adequada ao fechamento das instalações de disposição dos rejeitos, sem que haja a necessidade de uso de polímeros floculantes, o que se torna oneroso para operações em larga escala. No final de 2010, havia um acúmulo de 830 milhões de m^3 de rejeitos líquidos, dispostos em uma área aproximada de 180 km^2 .

6 | CONSIDERAÇÕES FINAIS

A ampliação do conhecimento sobre a produção de rejeitos espessados, pastas e rejeitos filtrados, em termos de físico-química de superfície, desaguamento, propriedades reológicas e descrição matemática dos fenômenos envolvidos, permitirá a consolidação de competência técnica para atendimento às demandas do setor, em prol de uma mineração mais sustentável.

Estão em desenvolvimento no Laboratório de Separação Sólido-Líquido do Serviço de Processos Minerai (SEPMI) do CETEM projetos tecnológicos com foco nas operações de espessamento mineral de alta concentração (pastas) e recuperação de água industrial em plantas de processamento de finos. Os estudos levam em consideração as características físico-químicas dos rejeitos, assim como da água de processo e a sua interação com os polímeros floculantes utilizados, visando a melhor eficiência das operações unitárias de espessamento e filtração na produção de rejeitos adensados, pastas minerai e/ou tortas de filtração. Tem-se, ainda, como foco, a recuperação de água, com características adequadas ao reuso no processamento mineral ou descarte.

Ressalta-se, ainda, como de grande importância, a inclusão do estudo reológico das polpas minerai, desenvolvimento de modelos matemáticos para a produção de pastas, bem como a construção dois protótipos de espessadores de alta capacidade/pastas, para finalização do estudo em escala piloto. Como resultado pretende-se ter mais conhecimento sobre a produção de pastas minerai (físico-química de superfície, reologia, desaguamento), descrição matemática dos fenômenos envolvidos, maior colaboração interinstitucional e maior competência técnica para atendimento às demandas do setor, em prol de uma mineração mais sustentável.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABAL – Associação Brasileira do Alumínio, Estatística Nacional Alumina 2016. <http://www.abal.org.br/estatisticas/nacionais/alumina>. Acesso em: 19 fevereiro 2018.

AI-XIANG, W., HUA-ZHE, J., JIANG, W.H., SHENG-KAI, Y., GAO-HUI, Y., XIAO-HUI, L. Mechanical model of scraper rake torque in deep-cone thickener. *J. Cent. South University*, v.43 (4), p. 1469-1474, 2012.

ANASTASIA, A., FERRAÇO, R., Plano de trabalho apreciado em Comissão – 2015 CTPNSB Comissão Temporária para Política Nacional de Segurança de Barragens, Brasília-DF, 15p., 2015.

ASTM, 1998. Annual Book of ASTM Standards. Designation: C 143/C 143M-97 Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete, v.04.02, Concrete and Aggregates, ASTM, 89–9.

ÁVILA, J.P. de e BICUDO, R.I. Boas práticas na gestão de projetos de barragens de rejeitos. In: Seminário sobre a gestão da segurança de barragens em mineração, Org. DNPM/IBRAM/SINDIEXTRA/FEAM/CREA-MG, 2014.

ÁVILA, J.P. Acidentes em barragens de rejeitos no Brasil. <http://www.energia.sp.gov.br/a2sitebox/arquivos/documentos/871.pdf>, 2015. Acesso em: 20 fevereiro 2016.

AZAM, S., JEERAVIPOOLVARN, S., SCOTT, J.D., Numerical modeling of tailings thickening for improved mine waste management. *Journal of Environmental Informatics*, 13(2), p. 111-118, 2009.

BARBATO, C.N. Estudo reológico de suspensões de bauxita. Tese (Doutorado), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Programa de Pós Graduação de Processos Químicos e Bioquímicos, Rio de Janeiro, 126p., 2011.

BARBATO, C. N.; FRANÇA, S. C.A.; NELE, M. Influence of solids concentration, particle size distribution, pH and temperature on yield stress of bauxite pulp. *TMS-Light Metals*, v. 1, p. 19-24, 2011.

BOGER, D.V. Rheology and the resource industries. Chemical Engineering Science, v. 64, p. 4525-4536, 2009.

BOGER, D.V. Rheology of Slurries and Environmental Impacts in the Mining Industry. The Annual Review of Chemical and Biomolecular Engineering, v. 4, p. 239-257, 2013.

BOX, G.E.P., HUNTER, W.G., HUNTER, J.S., Statistics for Experiments. Wiley. New York, 1978.

CHAVES, A.P. e Colaboradores, Desaguamento, espessamento e filtragem. Teoria e Prática do Tratamento de Minérios, v. 2, 4a Ed. revisada e aprimorada, Oficina de Textos, São paulo-SP, 240p., 2013.

CELLA, P. Projeto e gestão de sistema de rejeitos - perspectivas no Brasil. Seminário IBRAM 40 anos; apresentação de slides, 40p., 2017. In: <https://portaldamineracao.com.br/wp-content/uploads/2017/05/Projetos-e-gest%C3%A3o-de-sistema-de-rejeitos-perspectivas-no-brasil.pdf>. Acesso em: 27 novembro 2017.

CLAYTON, S., GRICE, T.G., BOGER, D.V. Analysis of the slump test for on-site yield stress measurement of mineral suspensions. International Journal of Mineral Processing, v. 70, p. 3-21, 2003.

CONCHA, F., SBARBARO, D., PEREIRA, A., SEGOVIA, J.P., VERGARA, S. On line instruments for measuring thickening parameters in industrial thickener. Proceedings of IMPC 2014 (Dewatering section), Gecamin Publications, Santiago, Chile, 2014.

DAVIES, M. Filtered dry stacked tailings – the fundamentals. Proceedings Tailings and Mine Waste 2011, Vancouver-BC, Canada, 2011.

ESPÓSITO, T.J. Metodologia probabilística e observacional aplicada a barragens de rejeitos construídas por aterro hidráulico. Tese (Doutorado), Universidade de Brasília, Brasília, 394 p., 2000.

FALCUCCI, A.; PERES, A.E.C. Abordagem prática para o uso de pastas minerais como forma de disposição de rejeitos. In: Acervo da 6a Edição do Congresso Brasileiro de Mina a Céu Aberto, Belo Horizonte-MG, 2010.

FRANCA, P.R.B. Projetos de disposição de rejeitos na VALE: diversidade de soluções, riscos e desafios. 130 Congresso Brasileiro de Mineração, 2009. www.ibram.org.br/sites/1300/1382/00000551.pdf. Acesso em: 19 fevereiro 2016.

FRANÇA, S.C.A., BISCAIA JR. E.C. & MASSARANI, G. Study of batch sedimentation simulation – establishment of constitutive equations. *Powder Technology*, v. 101, p. 157-164, 1999.

FRANÇA, S.C.A. Equações constitutivas para a sedimentação de suspensões floculentas. Tese de Doutorado, PEQ/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 96 p, 2000.

FRANÇA, S.C.A. e MASSARANI, G. Separação sólido-líquido. In: Tratamento de Minérios – 5a Ed. (Eds. Adão B. Luz, J.A. Sampaio e S.C.A. França), CETEM/MCT, Rio de Janeiro, 960p, 2010.

FREIRE NETO, J.P. Estudo da liquefação estática em rejeitos e aplicação de metodologia de análise de estabilidade. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Ouro Preto, Escola de Minas (NUGEO), 154 p., 2009.

FRITZKE, I., CAVALLI, D. Mining tailings dry stacking. Technical Communication presented at Tailings 2018 - 5th International Seminar on Tailings Management (Ed. Quelopana, H.), Santiago, Chile, 2018.

GADELHA, T.S. e FRANÇA, S.C.A. Estudo do desaguamento de polpas minerais para a produção de concentrados de alta percentagem de sólidos e pastas. Relatório Técnico RRB0011-00-15, CETEM/MCTI, 27p, 2015.

GARRIDO, P., CONCHA, F., BÜRGER, R. Settling velocities of particulate systems: 14. Unified model of sedimentation, centrifugation and filtration of flocculated suspensions, *International Journal of Mineral Processing*, v. 72, issues 1-4, p. 57-74, 2003.

GARRIDO, P., BURGOS, R., CONCHA, F., BÜRGER, R. Settling velocities of particulate systems: 13. A simulator for batch and continuous sedimentation of flocculated suspensions, *International Journal of Mineral Processing*, v. 73, p. 131-144, 2004.

HERNANDEZ, C.A.O., ARAUJO, A.C., VALADÃO, G.E.S., AMARANTE, S.C. Pasting characteristics of hematite/quartz systems. *Minerals Engineering*, 18 p. 935-939, 2005.

HERNANDEZ, C.A., QUIERO, A.I., ALEGRIA, P.I. Efeito da distribuição granulométrica sobre o comportamento reológico de pastas minerais. In: *Anais do XXVI Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa, Poços de Caldas-MG*, v. 3, p. 421-429, 2015.

JOHNSON, S.B., FRANKS, G.V., SCALES, P.J., BOGER, D.V. HEALY, T.W., Surface chemistry–rheology relationships in concentrated mineral suspensions. *International Journal of Mineral Processing*, v. 58, p. 267-304, 2000.

KLUG, R. RIVADENEIRA, A., SCHWARZ, N., Dewatering tailings: rapid water recovery by means of centrifuges. Chapter 5. *Proceedings of Tailings 2018 - 5th International Seminar on Tailings Management* (Ed. Quelopana, H.), Santiago, Chile, 2018.

LARRAURI, P.C., LALL, U. (2018). Tailings dams failures: updated statistical model for discharge volume and runoff. *Environments*, 5, 28; doi:10.3390/environments5020028.

LOAYZA, P.E. Estudo de eficiência de polímeros naturais (quitosana e ácido húmico) na floculação e desaguamento de polpas minerais. Dissertação de mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio), Programa de Pós Graduação em Engenharia de Materiais e Processos Químicos e Metalúrgicos, Rio de Janeiro, 147p, 2015.

MANCIN, R. IBRAM: Gestão para a Sustentabilidade na Mineração – 20 anos de história. Congresso Tocantinense de Engenharia e Mineração, 2015. In: <http://www.ibram.org.br/sites/1300/1382/00005260.pdf>. Acesso em: 13 fevereiro 2016.

MIERCZYNSKA-VASILEV, A., KOR, M., ADDAI-MENSAH, J., BEATTIE, D.A. The influence of polymer chemistry on adsorption and flocculation of talc suspensions. *Chemical Engineering Journal*, 220, pp. 375-382, 2013.

MIZZANI, S., SIMMS, P. Method-dependent variation of yield stress in a thickened gold tailings explained using a structure based viscosity model. *Minerals Engineering*, v. 98, p. 40-48, 2016.

NGUYEN, Q.D., D.V. BOGER, D.V. Application of rheology to solving tailings disposal problems. *International Journal of Mineral Processing*, v. 54, p. 217-233, 1998.

OLMEDO, C.G., MUÑOZ, J.A.B., GÓMEZ, A.R., GALINDO, D.G.L. Review of equipment for mine waste: from the conventional thickener to the deep cone for paste production. *DYNA Ingeniería e Industria (Bilbao)*, v. 90 (4), p. 359-365, 2015.

OSORIO, C.A.H., ARAUJO, A.C., VALADÃO, G.E.S. Estudo de características de algumas pastas minerais. *Tecnologia em Metalurgia e Materiais*, São Paulo, v. 4, n. 3, p. 50-55, 2008.

PARSAPOUR, G., ARGHAVANI, E., BANISI, S., MOUSAVI, S. Improving performance of the Gol-E-Gohar iron ore concentration plant thickener. *Proceedings of IMPC 2014 (Dewatering section)*, Gecamin Publications, Santiago, Chile, 2014.

PASHIAS, N., BOGER, D.V., SUMMERS, J., GLENISTER, D.J. A fifty cent rheometer for yield stress measurement. *Journal of Rheology*, v. 40, p. 1179-1189, 1996.

REZENDE NETO, M.C., FERREIRA, K.C., OLIVEIRA, M.S.M., VALADÃO, G.E.S. Obtenção de pastas minerais a partir do espessamento de lamas provenientes de processamento fosfático. *HOLOS*, v. 7, p. 148-155, 2015.

ROCHE, C., THYGESEN, K., BAKER, E. (Eds.). *Mine tailings storage: safety is no accident. A UNEP rapid response assessment*. United Nations Environment Programme and GRID-Arendal, Nairobi and Arendal, 68p., 2017. Disponível em www.grida.no.

ROBERTSON, A.M. Mine water solutions in extreme environments: challenges, technology and solutions (Keynote), 2013. In: <http://www.infomine.com/library/publications/docs/Robertson2013.pdf>. Acesso em: 21 fevereiro 2016.

SCHNEIDER, C.L. O CETEM e o desenvolvimento de tecnologias de processamento mineral para a eliminação de barragens de rejeito. Palestra em Seminário Técnico – Barragens de Mineração, Governo do Estado de São Paulo, Secretaria de Energia e Mineração, São Paulo, 2016.

SILVA FILHO, E. B.; ALVES, M.C.M.; DA MOTTA, M., Lama vermelha da indústria de beneficiamento de alumina: produção, características, disposição e aplicações alternativas. *Matéria*, v. 12 (2), p. 322-338, 2007.

SLOTTEE, S., JOHNSON, J., CROZIER, M. Paste thickening iron ore tailings. In: Proceedings of the XXXV Ironmaking and Raw Materials Seminar, VI Brazilian Symposium on Iron Ore, Florianópolis-Santa Catarina, 2005.

SOARES, L., BOSCOV, M.E. Barragens de rejeito. In: Tratamento de Minérios, 6^a Ed. (Eds. Luz, A.B., França, S.C.A. e Braga, P.F.A.), CETEM/MCTIC, Rio de Janeiro, p. 845-914, 2018.

SOFRÁ, F., BOGER, D.V., Environmental rheology for waste minimisation in the mineral industry. *Chem. Eng. Journal*, 86, p. 319-330, 2002.

TESSAROTTO, C., Empilhamento a seco para rejeitos de processos minerais (dry stacking). In: Anais do XXVI Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa, Poços de Caldas-MG, v. 3, p. 430-437, 2015.

THOMPSON, N.; MORENO, P. Thickened tailings deposition for closure. In: Proceedings of the 20th International Seminar on Paste and Thickened Tailings (A. Wu & R. Jewell Eds), University of Science and Technology Beijing, Beijing, p. 226-234, 2017.

WILHEM, J.H., NAIDE, Y., Sizing and operating continuous thickeners. *Mining Engineering*, v. 33, n. 12, p.1710-1718, 1981.

WILLIAMS, R., ZINK, D., O'BREIN, S. Filtered tailings adds value in cost competitive industries. Proceedings of the Paste 2017, p.363-370.

WILLS, B.A., FINCH, J.A. Tailings Disposal. In: Will's Mineral Processing Technology, 8th Ed., Elsevier Ltd, p. 439-448, 2016.

ZHANG, Y., GRASSIA, P., MARTIN, A., USHER, S.P. SCALES, P.J. Mathematical modelling of batch sedimentation subject to slow aggregate densification. Chemical Engineering Science, v. 128, p. 54-63, 2015.

SÉRIES CETEM

As Séries Monográficas do CETEM são o principal material de divulgação da produção científica realizada no Centro. Até o final do ano de 2017, já foram publicados, eletronicamente e/ou impressos em papel, mais de 320 títulos, distribuídos entre as seis séries atualmente em circulação: Rochas e Minerais Industriais (SRMI), Tecnologia Mineral (STM), Tecnologia Ambiental (STA), Estudos e Documentos (SED), Gestão e Planejamento Ambiental (SGPA) e Inovação e Qualidade (SIQ). A Série Iniciação Científica consiste numa publicação eletrônica anual.

A lista das publicações poderá ser consultada em nossa homepage. As obras estão disponíveis em texto completo para download. Visite-nos em <http://www.cetem.gov.br/series>.

Últimos números da Série Tecnologia Ambiental

STA-101 – **Avaliação das emissões de mercúrio em garimpos brasileiros: fontes de emissão de rotas de processamento.** Patricia Correia de Araujo e Julia Nascimento Souza, 2018.

STA-100 – **Recuperação de zinco de sucata de aço galvanizado.** Luis Gonzaga Santos Sobral, Débora Monteiro de Oliveira e Ana Maria Garcia Lima, 2018.

STA-99 – **Perdas de metais preciosos e liberação de mercúrio elementar durante a decomposição térmica de amálgama: uma abordagem prática.** Luis Gonzaga Santos Sobral, Julia Nascimento Souza e Patricia Correia de Araujo, 2018.

INFORMAÇÕES GERAIS

CETEM – Centro de Tecnologia Mineral
Avenida Pedro Calmon, 900 – Cidade Universitária
21941-908 – Rio de Janeiro – RJ
Geral: (21) 3865-7222
Biblioteca: (21) 3865-7218
E-mail: biblioteca@cetem.gov.br
Homepage: <http://www.cetem.gov.br>

NOVAS PUBLICAÇÕES

Se você se interessar por um número maior de exemplares ou outro título de uma das nossas publicações, entre em contato com a nossa biblioteca no endereço acima.

Solicita-se permuta.

We ask for interchange.