

Revisão da Literatura

O que significa descaracterizar barragens de rejeitos de mineração? Uma revisão sistemática da literatura

What does it mean to 'decharacterize' tailings dams? A systematic literature review

Rafaela Shinobe Massignan^{1*} , Luis Enrique Sánchez¹ 

RESUMO

ABSTRACT

Nova legislação que determina a descaracterização de barragens de rejeitos de mineração motivou esta revisão de métodos e técnicas de descaracterização e seus impactos ambientais. Foram identificados 105 artigos, publicados desde 1983, que descrevem soluções ou discutem desafios ao fechamento de barragens, quanto à estabilidade geotécnica e geoquímica, revegetação ou reutilização dos rejeitos, usualmente almejando a integração segura da barragem ao entorno. Apenas seis artigos abordam impactos ambientais das obras de descaracterização — como aumento do tráfego rodoviário — e riscos associados à fitorremediação — particularmente a transferência de metais à cadeia alimentar. O assunto é pouco explorado na literatura internacional. Não há entendimento compartilhado sobre o significado de descaracterização, fechamento e termos relacionados. A experiência brasileira que resultará do atendimento à legislação, se devidamente analisada e documentada, contribuirá para o avanço do conhecimento e das técnicas de fechamento de barragens de rejeito.

New legislation that requires "decharacterizing" or decommissioning tailings storage facilities (TSFs) has motivated this review of "decharacterization" methods and techniques for and their environmental impacts. Out of 105 papers, published since 1983, that describe solutions or discuss challenges to closed TSFs, regarding geotechnical and geochemical stability, revegetation, or reuse of tailings, generally aiming at safely integrating the facility to the landscape, only six papers approach environmental impacts of decommissioning works - such as increased road traffic -, and risks associated with phytoremediation - in particular the transfer of metals to the food chain. The subject is little explored in international literature. There is no shared understanding about the meaning of decommissioning, closure and related terms. The Brazilian experience that will result from complying with legislation, if properly analyzed and documented, will contribute to the advancement of knowledge about TSFs closing techniques.

Palavras-chave: descaracterização; barragem de rejeitos; revisão sistemática.

Keywords: decommissioning; tailings dams; systematic review.

INTRODUÇÃO

Depois de dois colapsos catastróficos de barragens de rejeitos de mineração no Brasil — barragem do Fundão em Mariana (5 de novembro de 2015) e barragem Córrego do Feijão em Brumadinho (25 de janeiro de 2019), ambas em Minas Gerais —, nova legislação proíbe a construção e o licenciamento ambiental de barragens erguidas segundo o mesmo método construtivo (denominado de alteamento a montante) e determina que as barragens desse tipo existentes sejam "descaracterizadas".

Apenas em Minas Gerais, estima-se que existam 45 estruturas desse tipo, que devem ser descaracterizadas no prazo de três anos a partir da publicação da Lei nº 23.291, de 25 de fevereiro de 2019¹ (MINAS GERAIS, 2019). Com a publicação da Resolução nº 13, de 8 de agosto de 2019, da Agência

Nacional de Mineração (ANM) (BRASIL, 2019), exigência similar passou a valer nacionalmente, reforçada pela modificação da Lei da Política Nacional de Segurança de Barragens, de 30 de setembro de 2020, que estabeleceu prazos mais dilatados que a lei mineira. A exigência é uma iniciativa pioneira no mundo, para a qual existe escassa orientação técnica. A expressão "descaracterizar" uma barragem não é usual na engenharia de barragens, embora esteja documentada na literatura brasileira e seja empregada por uma grande empresa do setor (SÁNCHEZ; SILVA-SÁNCHEZ; NERI, 2013). O significado de "descaracterização" pode se prestar a múltiplas interpretações. Trata-se de remover uma barragem e os rejeitos armazenados em seu reservatório? Ou basta estabilizar a estrutura drenando os rejeitos e desviando o fluxo de água superficial?

¹A base de dados da Agência Nacional de Mineração (SIGBM) conta 64 barragens de rejeito alteadas pelo método de montante, ou por método declarado como desconhecido, no Sistema de Gestão de Segurança de Barragem de Mineração. <https://app.anm.gov.br/SIGBM/Publico/Estatistica>. Acesso em: 15 mai. 2021.

¹Universidade de São Paulo - São Paulo (SP), Brasil.

*Autor correspondente: rafaela.s.massignan@gmail.com

Conflitos de interesse: não há conflitos de interesse.

Financiamento: Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), processo nº 118465/2019-8.

Recebido: 05/12/2020 - Aceito: 27/07/2021 - Reg. ABES: 20200422

Na mineração, rejeito é um “subproduto (...) que consiste nos resíduos do material processado resultante da separação dos produtos de valor (minério) da rocha ou solo nos quais ocorrem” (GTR, 2020) e consiste em uma mistura de líquidos e sólidos finos, variando de coloides a areias, que contém água e reagentes do processo de concentração mineral.

Como forma de disposição do rejeito, as barragens são estruturas amplamente utilizadas pelas mineradoras com o intuito de armazenar os resíduos, evitar contaminações e possibilitar o reúso da água. A fim de reduzir os custos iniciais e flexibilizar a produção, durante a fase de operação, as barragens podem ser alteadas a montante ou a jusante de um dique inicial, ou mantendo o eixo da barragem igual ao inicial, conforme a Figura 1.

Com poucos casos documentados no Brasil, há escassa experiência prática e conhecimento limitado sobre os impactos da descaracterização de barragens de rejeito. Por essa razão, uma revisão sistemática da literatura, ao levantar o estado da arte, pode contribuir para a preparação de projetos de descaracterização — requeridos para atender aos recentes requisitos legais — e para a implementação dos projetos, o monitoramento e a avaliação dos resultados.

O presente trabalho tem como objetivos: (1) a identificação de métodos e técnicas de descaracterização de barragens de rejeito descritos, analisados ou mencionados na literatura, (2) a verificação de se a literatura descreve os impactos ambientais dessas obras, e (3) a análise do emprego do conceito de “descaracterização” e termos afins.

METODOLOGIA

Para a busca de referências, foram selecionadas cinco bases de dados: *Google Scholar*, *Science Direct*, *Engineering Research Database*, *Scopus* e *Web of Science*. Foram também selecionados materiais do congresso *Mine Closure* não indexados às bases de dados, pois esse evento é especializado em fechamento de mina e contém trabalhos sobre barragens de rejeitos.

As buscas foram realizadas pela combinação das seguintes palavras-chave: *upstream dam*, *decommissioning*, *rehabilitation*, *tailings*, *dam*, *tailing dam*, *tailing*

storage facility, *closure tailing disposal*. As buscas foram realizadas no período de 25 de fevereiro a 28 de março de 2020, e não se aplicou aos artigos limite temporal inferior de publicação.

Em seguida, estudaram-se os artigos selecionados a fim de responder às seguintes perguntas: (1) como fazer a descaracterização de uma barragem de rejeitos? Quais as técnicas mais viáveis? (2) Quais os impactos da descaracterização de barragens de rejeito? (3) Qual o conceito de “descaracterização” e termos afins? Os artigos que não respondiam a nenhuma das questões foram excluídos da pesquisa.

Após análise, os artigos foram agrupados de acordo com a pergunta respondida, para a elaboração da síntese dos estudos. No caso da pergunta 1, os trabalhos foram classificados em seis subdivisões: *Revegetação*, *Fitorremediação*, *Remoção e/ou Reprocessamento*, *Geotécnico*, *Geoquímico* e *Aspectos Gerais*. Um artigo poderia responder a mais de uma pergunta, mas não há sobreposições entre as subdivisões da pergunta 1.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram selecionados 105 artigos das bases de dados e dos anais dos congressos *Mine Closure*, sendo 29 deste, quatro do *Google Scholar*, 19 do *Science Direct*, 18 do *Engineering Research Database*, 25 do *Scopus* e dez do *Web of Science*. Os artigos foram classificados de acordo com a(s) pergunta(s) que respondiam (Tabela 1). Se classificado na pergunta 1, o trabalho era também classificado em subdivisões, sem sobreposição (Tabela 2). Dos textos selecionados, 50,5% (53 artigos) foram publicados em congressos, sugerindo que o tema desperta tanto interesse acadêmico como profissional.

Aspectos gerais de fechamento de barragens de rejeitos

Entre os artigos analisados, seis abordam conceitualmente boas práticas genéricas no fechamento de barragens, apresentando dificuldades a serem superadas, objetivos e custos.

Segundo Bjelkevick (2011), o planejamento do fechamento de barragens de rejeito deve começar concomitantemente ao planejamento da estrutura a fim de

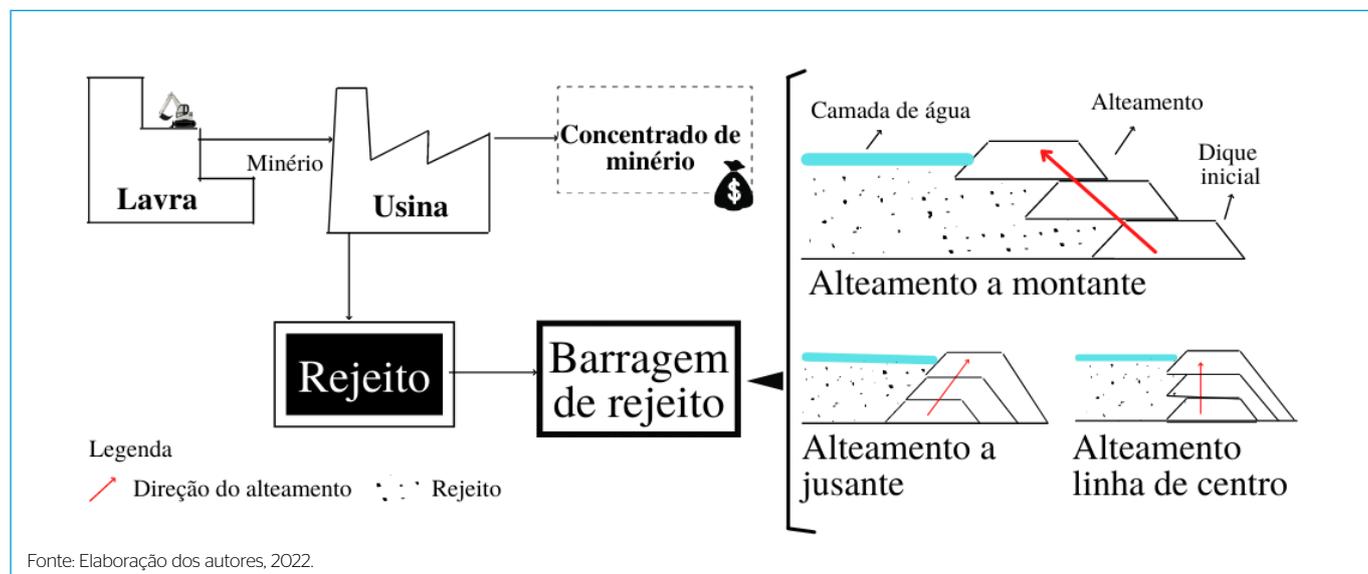


Figura 1 - Infográfico sobre a geração de rejeitos e métodos de alteamento de barragens de rejeitos.

garantir o descomissionamento sustentável e a redução dos custos. O método de disposição selecionado, a gestão do balanço hídrico, a qual é exemplificada na Figura 2, e a caracterização do rejeito (PRITCHARD; JENSEN; WELSH, 2010) influenciam a reabilitação de barragens, ao passo que o fechamento é dificultado em função das áreas extensas que ocupam e dos potenciais de erosão e infiltração.

Pozzo *et al.* (2006) sugerem planejar o fechamento com base na análise de riscos nas áreas de geologia, geotecnia, sismicidade, hidrometeorologia, população e ambiente, enquanto Lacy (2005) afirma que a documentação do histórico da barragem é fundamental, pois influencia o sucesso do descomissionamento. Já Pritchard, Jensen e Welsh (2010) sugerem testes de campo com monitoramento, e Lacy (2005) e Bjelkevick (2011), o monitoramento no período pós-fechamento com o intuito de garantir que os objetivos sejam atingidos.

Questões geotécnicas

Os 12 artigos classificados como “Geotécnicos” abordam estabilidade da estrutura da barragem, problemas na fundação, fator de segurança, taludes ou processos erosivos.

De acordo com Bellenfant *et al.* (2013), a cobertura do rejeito é a principal medida no controle à erosão, pois evita contato externo com o material e

sua dispersão. Na mina de carvão New Acland, em Oakey, Austrália, foi decidido o fechamento da barragem de rejeitos por meio de uma cobertura de um horizonte fino, seguido de outro mais espesso, ambos de rejeito de granulação grosseira de carvão, e uma camada de solo superficial, a qual seria semeada e fertilizada para o estabelecimento de pasto (WILLIAMS; KING, 2016). Para garantir o tráfego seguro dos equipamentos e materiais, foi estudada a estabilidade do rejeito no início e ao longo do progresso dos trabalhos. Com o teste da palheta de cisalhamento, foi estimada a tensão de cisalhamento ao longo do perfil do rejeito, e as obras foram iniciadas nas regiões mais resistentes da praia.

Justo *et al.* (2019) descreveram o fechamento da barragem de rejeitos de cobre, zinco e chumbo da mina Almagrera, em Huelva, Espanha, que apresentava baixo fator de segurança do talude. A barragem teve cinco alteamentos a jusante, porém essas operações não foram documentadas corretamente, dificultando o fechamento. Inicialmente, foram feitas investigações e reconhecimento de campo, seguidos de obras de drenagem, reforço do talude, cobertura final dos rejeitos e monitoramento ao longo de todos os processos. A drenagem do reservatório ocorreu por canais laterais de drenagem e bombeamento da água. Esta e a água contaminada por infiltrações a jusante da barragem foram bombeadas a montante para tratamento e posterior descarte em córregos. O reforço

Tabela 1 – Definições e resultados das classificações da revisão sistemática.

Pergunta	Escopo dos artigos	Quantidade
1 Como fazer a descaracterização de uma barragem de rejeitos? Quais as técnicas mais viáveis?	Técnicas e métodos de descaracterização de barragens de rejeito, nos temas, foram subdivididas em Aspectos Gerais, Geotécnico, Remoção e/ou Reprocessamento, Geoquímico, Revegetação e Fitorremediação (Tabela 3).	88
2 Quais são os impactos na descaracterização de barragens?	Impactos da descaracterização de barragens de rejeito conceitualmente, ou que ocorreram em estudos de caso.	6 (6 artigos sobrepõem-se na Pergunta 1)
3 Qual o conceito de descaracterização e termos afins?	Conceitos, exemplos ou objetivos do que seriam <i>decommissioning</i> , <i>rehabilitation</i> , <i>closure</i> , <i>remediation</i> e <i>reclamation</i> .	24 (23 artigos sobrepõem-se na Pergunta 1)
Excluídos	Revisões bibliográficas, falha na metodologia ou idiomas diferente de inglês ou português ² . Não respondem a nenhuma das três perguntas.	16
Total de artigos analisados	Ressalta-se que há sobreposições entre as classificações, logo são somados os 88 artigos da Pergunta 1, um artigo sem sobreposição da Pergunta 3 e os 16 artigos excluídos.	105

Fonte: Elaboração dos autores, 2022.

Tabela 2 – Definições e resultados das subdivisões da classificação da Pergunta 1 da revisão sistemática.

Subdivisão	Escopo dos artigos	Quantidade
Aspectos Gerais	Dificuldades a serem superadas, objetivos, custos e boas práticas genéricas no fechamento de barragens de rejeito.	6
Geotécnico	Estabilidade da estrutura da barragem, problemas na fundação, baixo fator de segurança, questões do talude ou erosão do rejeito.	12
Remoção e/ou Reprocessamento	Remoção do rejeito, com reprocessamento ou redistribuição do material.	4
Geoquímico	Drenagem ácida, tratamento da água subterrânea contaminada, material radioativo, camada de água sem mencionar vegetação, ou importância da caracterização geoquímica dos rejeitos.	23
Revegetação	Revegetação e questões relacionadas (melhoras de solo, escolha de espécies, monitoramento, técnica de <i>wetlands</i>), sem objetivar fitorremediação.	23
Fitorremediação	Análogo à subdivisão Revegetação, porém objetiva a fitorremediação na revegetação, ou há relatos de casos.	20
	Total de artigos classificados em “Pergunta 1” Ressalta-se que não há sobreposição entre as subdivisões da Pergunta 1. Logo, são somadas as quantidades de todas as seis subdivisões.	88
	Total de artigos analisado	105

Fonte: Elaboração dos autores, 2022.

da barragem foi executado por meio da adição de um talude a jusante, a fim de atingir o fator de segurança exigido na legislação espanhola. Observou-se que o reforço do talude efetivamente aumentou o fator de segurança. A cobertura dos rejeitos consistiu em nivelamento da superfície e uma camada argilosa de 10 cm. Em regiões onde o maquinário não conseguia se locomover, foi colocada uma cobertura geotêxtil. Após a estabilização da superfície da barragem, foram construídos poços para acelerar o rebaixamento do nível da água.

A barragem a montante de rejeito de cobre, zinco e prata da mineradora Caudalosa, em Huancavelica, Peru, também possuía baixo fator de segurança, além de sinais de instabilidade, que indicavam possibilidade de falha. Conforme Garga e De La Torre (2002), foram adotadas medidas de emergência, como a construção de um talude estabilizador e de extensas trincheiras a jusante. Estas foram divididas em dez trincheiras transversais e duas longitudinais, a jusante da barragem, provendo uma medida de segurança e de baixo custo. As trincheiras longitudinais foram preenchidas com

rocha estéril, e as transversais obtiveram sistema de drenagem. O objetivo dessa obra foi aumentar a resistência ao cisalhamento, a dissipação de pressão de poro e a drenagem. Consoante os autores, as medidas de remediação produziram resultados quase imediatos e não foram constatadas novas evidências de instabilização.

As obras de aumento do fator de segurança da barragem de rejeito de carvão da mina Jan Sverma, em Zacler, República Tcheca, consistiram em controle de erosão e implantação de sistemas de drenagem. De acordo com Hudecek *et al.* (2016), os taludes foram nivelados e reforçados com *geogrid*, além da plantação de arbustos. No pé dos taludes foi instalado um reforço de 5,4 m de comprimento e 3,0 m de largura, a fim de aumentar o fator de segurança. O sistema de drenagem foi composto de trincheiras e canos de plástico ondulado. Segundo Hudecek *et al.* (2016), a barragem pós-fechamento tornou-se parte do parque de ciclismo Halda, com percurso total de 3 km e inclinações favoráveis ao esporte.

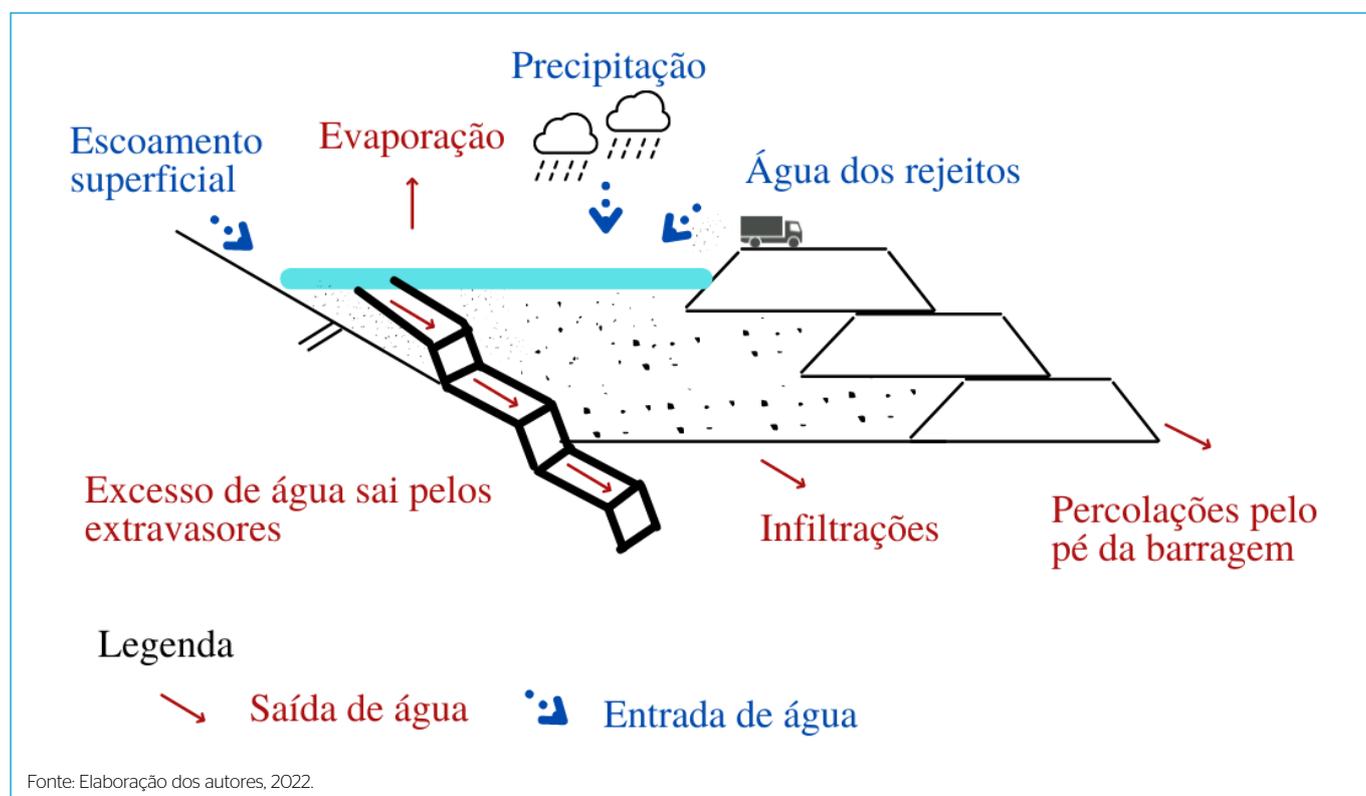


Figura 2 - Balanço de água em barragens de rejeitos.

Tabela 3 - Conceitos e definições, segundo a literatura, de termos relacionados à descaracterização.

Termo	Conceitos e definições
Rehabilitation	The main intentions of rehabilitation are for " little or no maintenance in long-term and eliminate multiple sources of pollution " (BAKHTAVAR; SHAHRIAR; OSANLOO, 2006, grifo nosso).
Remediation	"The remediation has to ensure the safe long-term storage of the tailings reducing the additional equivalent dose to the population from all pathways " (BARNEKOW <i>et al.</i> , 2012, grifo nosso).
Reclamation	"Performing certain activities for protection of the environment against tailing dams" (DIMISKOVSKA; ZEQRIRI, 2015, grifo nosso).
Decommissioning	" Decommissioning refers to the process that begins near, or at, the cessation of mineral production and ends with the removal of unwanted infrastructure and services " (PANG <i>et al.</i> , 2009, grifo nosso).
Closure	" Closure relates to the whole of mine life process and includes both decommissioning and rehabilitation " (PANG <i>et al.</i> , 2009, grifo nosso).

Fonte: Elaboração dos autores, 2022.

Remoção e/ou reprocessamento dos rejeitos

Entre os artigos analisados, quatro abordam a remoção dos rejeitos para reprocessamento ou redistribuição do material. Esse é o caso do descomissionamento, descrito por Araújo, Diniz e Santos (2019), de uma barragem de rejeitos de minério de ferro no Quadrilátero Ferrífero, em Minas Gerais. Em razão da falta de espaço para a realocação do volume total, decidiu-se pela remoção parcial, retirando-se 990.000 m³ de 1.900.000 m³ de rejeito. Dessa maneira, a altura do maciço pode ser reduzida de 35,0 m a 12,0 m. A barragem remanescente seria então coberta por uma camada de solo argiloso e revegetada com espécies nativas da Mata Atlântica, reintegrando a estrutura ao entorno. Araújo, Diniz e Santos (2019) ressaltam que estavam previstos o monitoramento e a manutenção da área após a descaracterização da barragem, a fim de garantir a estabilidade e o sucesso dos sistemas de prevenção e mitigação.

Figueiredo, Vila e Fiúza (2018) avaliaram as viabilidades econômica, social e ambiental do reprocessamento dos rejeitos da barragem da mina Cabeço do Pião, em Castelo Branco, Portugal. Identificou-se que o reaproveitamento de rejeitos de tungstênio e zinco representava interesse econômico, geração de emprego e possibilidade de remediação da área degradada, devendo-se comprovar a viabilidade econômica do reprocessamento.

Já Sözen *et al.* (2017) descreveram o reaproveitamento dos rejeitos de cobre de uma barragem em Lefka, Turquia. Obras de drenagem, remoção do rejeito e reprocessamento dos resíduos foram contempladas. Além disso, os novos rejeitos foram estabilizados quimicamente para disposição final na mesma barragem inicial.

Outro caso de reutilização dos rejeitos é o de uma barragem de ferro de dois alteamentos, no Pará, cuja viabilidade econômica foi comprovada após a caracterização dos resíduos (DE SOUZA *et al.*, 2019). A recuperação estimada foi de 90% do volume total de rejeitos (76 milhões m³), os quais seriam parcialmente removidos por quatro dragas de sucção, e o restante, mecanicamente. Grande parte pode ser processada a *pellet feed* por meio de apenas deslamagem e filtragem.

Questões geoquímicas dos rejeitos

Vinte e três artigos analisados discorrem sobre os temas: drenagem ácida, fechamento de barragens de material radioativo, disposição sob lâmina de água ou caracterização geoquímica dos rejeitos. O fechamento de barragens de rejeitos geradores de drenagem ácida é um problema complexo.

Para evitar a drenagem ácida, aplicou-se uma cobertura de rejeito parcialmente dessulfurizado e outra de água em uma barragem de rejeitos de ouro em Timmins, Canadá (CASH *et al.*, 2012). A camada de 1,0 m atuou como barreira de oxigênio, além de consumi-lo, reduzindo a probabilidade de drenagem ácida. Análise feita 11 anos após a reabilitação identificou oxidação somente em algumas áreas pontuais, prevenindo a drenagem ácida. Solução semelhante foi adotada na barragem da mina Manitou, no Canadá, de ouro, prata, cobre e zinco (ETHIER *et al.*, 2018). Por outro lado, os riscos decorrentes do armazenamento de rejeitos de urânio estão atrelados à lixiviação de radionuclídeos e à emissão de radiação ionizante e de gás radônio (GUNSINGER; ANDRYUCHOW; BECKER, 2013). Um dos métodos de fechamento seria a cobertura de água, a qual reduz o fluxo de radônio e evita a erosão eólica, mas não é indicada porque poderia causar contaminação por meio de infiltrações, desestabilizar o talude (MYLONA *et al.*, 2007) e, em virtude das mudanças climáticas, sua sustentabilidade em longo prazo é questionável (GUNSINGER; ANDRYUCHOW;

BECKER, 2013). Logo, a cobertura dos rejeitos com materiais secos foi defendida por Mylona *et al.* (2007) em função de conter erosão, prover estabilização química, controlar infiltrações, minimizar emissões radioativas e gerar nutrientes à vegetação. Em descomissionamento de duas barragens em Pécs, Hungria, os autores estudaram o procedimento de estabilização do rejeito fino e de retirada da água, aplicação de tela de aço e 0,5 m de areia. Após o fechamento foi mantido o monitoramento, em frequência decrescente com o tempo.

Já na reabilitação da barragem de rejeitos de urânio em Le Bouchet, França, Labeled *et al.* (1996) relataram obras de nivelamento e compactação dos resíduos, instalação de uma tela e um geotecido, com o objetivo de segregar o rejeito da camada de argila sobreposta. Esta foi compactada e, em seguida, adicionou-se uma camada drenante de areia e cascalho e outra de terra e gramíneas.

Georgescu e Popescu (2008) aplicaram uma sequência de materiais naturais e sintéticos em uma barragem de rejeitos radioativos na Romênia. A cobertura foi composta de geotecido para drenagem, 15 cm de argila, camada de areia e bentonita, 7 cm de polímero Trisoplast, 30 cm de solo, outra camada de geotecido e fertilizantes. Baseado na análise de risco, o plano de fechamento previa evitar a lixiviação e a migração de metais, prevenir infiltrações, controlar emissões de radônio e de ondas gama.

Já a reabilitação de uma barragem de rejeitos de urânio no leste da Alemanha utilizou somente materiais naturais com o intuito de promover estabilidade de longo prazo, consoante Merkel e Linder (2013). Estudos de campo e laboratório concluíram que havia necessidade de aceleração da consolidação do rejeito fino, a fim de criar uma superfície estável. Para isso, foram instalados drenos verticais e profundos, uma camada horizontal de drenagem e poços nas áreas saturadas. Em seguida, a praia recebeu 2,5 m de rocha estéril e foi revegetada. Sobre o rejeito fino, foi colocada uma camada 2,5 m de rocha estéril, em seguida revegetada com gramíneas. Além disso, constatou-se a contaminação da água subterrânea, e foi necessário instalar um sistema de drenagem para coletar toda a água de infiltrações e escoamentos, que, após tratada, foi descartada no rio próximo (BARNEKOW *et al.*, 2012).

Baseado nos resultados da caracterização geoquímica e granulométrica do rejeito de chumbo, zinco, prata e ferro de uma barragem em Murcia, Espanha, e de ensaios de resistividade elétrica, Martínez-Pagán *et al.* (2011) descrevem a aplicação de matéria orgânica e de resíduos de mármore, misturando-os ao rejeito até a profundidade de 50 cm para neutralizar o pH.

Revegetação de barragens de rejeitos

Entre os 105 artigos analisados, 23 abordam revegetação, apresentando técnicas de melhoras de solo, escolha de espécies e monitoramento, ou estudam *wetlands*, sem objetivar fitorremediação.

Consoante Norland e Veith (1995), a cobertura vegetal em barragens de rejeitos aumenta a quantidade de matéria orgânica e de atividade biológica, além de melhorar a estética e possibilitar mais usos pós-fechamento. Consequente à revegetação, os autores confirmaram controle de erosão, assim como Sawatsky *et al.* (1996) e Yan, Zhao e Sun (2013).

Entretanto, os rejeitos possuem adversidades à revegetação, que podem ser minimizadas com tratamento adequado. Para corrigir a acidez e a escassez de matéria orgânica em rejeito de ouro em Delijan, Irã, foram aplicados cal e um *spray* de água, que lixiviou os óxidos de pirita da superfície, seguidos de fertilizante e da construção de uma proteção contra o vento (BAKHTAVAR; SHAHRIAR; OSANLOO, 2006).

Em contraposição, a companhia de mineração Idarado, situada no Colorado, Estados Unidos, testou combinações de feno, esterco, cal e fertilizante em seis barragens de rejeito de ouro, prata, cobre, chumbo e zinco. Conforme Redente (2009), foram aplicadas gramíneas e flores de pequeno porte, e concluiu-se que a adição de cal foi fundamental para evitar a drenagem ácida.

Para superar a esterilidade e a toxicidade dos rejeitos, Ribeiro *et al.* (2018) defenderam a aplicação de solo superficial, o qual é fonte de quantidade expressiva de biomassa, matéria orgânica e sementes de espécies que atraem polinizadores.

Outra questão fundamental para a revegetação é a escolha de espécies, que deve ser feita em função de clima, solo, condições de drenagem e condições bióticas (SAWATSKY *et al.*, 1996). Domingo e David (2014) indicaram plantas pioneiras e leguminosas, as quais fixam nitrogênio no solo, característica vantajosa aos rejeitos, que normalmente são desprovidos desse nutriente. Já para a definição das melhores espécies vegetais em uma barragem de rejeito de magnetita na Austrália Ocidental, foram realizados testes de campo. Cross *et al.* (2019) analisaram o desenvolvimento de árvores no rejeito com e sem solo superficial, além da aplicação de fertilizantes.

Em Alberta, Canadá, Woosaree e Anderson (2012) testaram gramíneas na barragem de rejeito de areia betuminosa. Gramíneas foram selecionadas em função do rápido desenvolvimento, e constatou-se que as espécies nativas se adaptaram melhor aos baixos níveis de nutrientes, até mesmo em plantio direto ao rejeito. Como tratamento, foram adicionadas pelotas de alfafa, as quais melhoraram a umidade e liberaram nutrientes de forma lenta, não necessitando de nova reposição de fertilizantes no ano seguinte. De acordo com os autores, o monitoramento contínuo deve ser realizado a fim de garantir longo prazo, sucesso e sustentabilidade ao processo.

Da mesma forma, o monitoramento pós-revegetação foi feito na barragem de rejeitos de ouro da mina Kidston, Austrália, com vistas a garantir os objetivos do fechamento (MULLIGAN *et al.*, 2006). A reabilitação ocorreu com a plantação de mudas de espécies nativas, fertilização e irrigação nos quatro primeiros meses, mas identificou-se a geração excessiva de poeira. Em consequência, gramíneas nativas e leguminosas foram plantadas também, mitigando a erosão.

A fim de selecionar espécies que melhor se adaptassem ao rejeito de estanho de uma barragem na Indonésia, Nurtjahya *et al.* (2008) testaram combinações de fertilizantes, leguminosas e solo superficial para a revegetação, selecionando a solução mais indicada. Para indicar o melhor tratamento para plantio sobre rejeitos de diamante em uma barragem na África do Sul, Rensburg, Maboeta e Morgenthal (2003) também desempenharam análises de espécies de gramíneas em vasos semeadas sobre substrato com diferentes tratamentos com adição de fertilizantes, matéria orgânica e minhocas. O rejeito da mina apresentava pH alcalino e baixa concentração de nitrogênio, fósforo, potássio, sódio e sulfatos. Nas amostras sem tratamento, observou-se que não houve germinação, o que evidenciou a dificuldade de revegetação de barragens de rejeitos.

Alternativamente, a revegetação da barragem de rejeitos de cobre e ouro situada em Mimika, Indonésia, aplicou espécies que gerassem valor econômico. Conforme Prewitt e Puradyatmika (2012), o rejeito apresentava baixa concentração de nitrogênio, fósforo, potássio e matéria orgânica, além de altos níveis de cálcio, magnésio, cobre, ferro, manganês, zinco e enxofre e pH entre 6 e 8. O fechamento da barragem adotou três abordagens, uma delas o cultivo de espécies pioneiras, gramíneas e árvores que fixam nitrogênio no solo ou possibilitam a extração de óleo e sementes, sendo possíveis futuras extrações vegetais.

Outra região destinou-se à agricultura, a qual necessitou da aplicação de matéria orgânica. As frutas e verduras foram analisadas em laboratório; constatou-se que a concentração de metais era baixa, e o consumo foi considerado seguro.

Em vez do modelo clássico de descomissionamento, foi construída uma *wetland* artificial em três barragens de rejeito construídas em cascata na mina de manganês Cachoeira, em Minas Gerais. Trata-se de uma área pantanosa, alagada periódica ou permanentemente, o que reduz o risco de falhas e melhora a qualidade da água, conforme Namba *et al.* (2010). Para analisar a estabilidade, foram realizados estudos cinéticos e hidráulicos do escoamento de água sobre as barragens, e foi utilizado o *software* Slide para se avaliar a estabilidade geotécnica das estruturas. Quanto à revegetação, foram selecionadas espécies nativas para a margem das barragens e macrófitas para as lagoas, permanentemente alagadas. A vegetação diminui a velocidade de escoamento da água, reduzindo a erosão. Spain e Tibbett (2012), McCabe e Otte (2000) também descrevem a aplicação de *wetlands* no fechamento de barragens.

Fitorremediação dos rejeitos

Essa classificação foi diferenciada de “Revegetação”, pois, além de abordar a revegetação e questões relacionadas, 20 artigos estudam e objetivam a fitorremediação ou relatam sua ocorrência não planejada.

Segundo Xie e Zyl (2020), o termo “revegetação” refere-se à reconstrução do ecossistema e ao restabelecimento da função ecológica original. Já a “fitorremediação” indica o uso de plantas resistentes a locais contaminados com a finalidade de reduzir altas concentrações de metais pesados e substâncias tóxicas e descontaminar água e sedimentos. Dessa maneira, objetiva-se reduzir e estabilizar a mobilidade de metais e metalóides. A fitorremediação é classificada em três abordagens: fitovolatilização, fitoextração e fitoestabilização. A primeira relaciona-se à retirada dos contaminantes e à liberação na atmosfera; a segunda, à captação de substâncias e à acumulação nos caules e folhas; e a terceira, à redução da mobilidade e da biodisponibilidade dos contaminantes (XIE; ZYL, 2020; WANG *et al.*, 2017; KARACA; CAMESELLE; REDDY, 2018).

Após a retirada de contaminantes, espécies de fitoextração devem ser colhidas e incineradas (MENDEZ; MAIER, 2008) ou utilizadas na produção de biocombustíveis, em razão de a fitoextração de metais inviabilizar o consumo humano (REGNIER *et al.*, 2011). Da mesma maneira, Karaca, Cameselle e Reddy (2018) ressaltaram que a fitoextração pode contaminar cadeias alimentares, e por isso a fitoestabilização é preferível.

De acordo com Wang *et al.* (2017), a seleção apropriada de espécies vegetais é a questão mais importante à fitorremediação. Karaca, Cameselle e Reddy (2018) sugeriram espécies nativas, tolerantes a metais, resistentes a pragas e doenças e não atraentes à fauna. Ademais, os autores alegaram que se deve determinar a vegetação propícia ao clima local e quantificar os substratos.

Já Tapia *et al.* (2017) realizaram testes em vasos para analisar a fitorremediação no rejeito de cobre da barragem Ovejería, no Chile. Foram aplicadas diferentes combinações de rejeito e ácido húmico, e após 120 dias de cultivo se constatou que a concentração de ferro na vegetação era alta e que havia capacidade de acumulação de manganês. Além disso, o ácido húmico aumentou os níveis de cobre nas raízes e os reduziu nos caules e folhas, logo auxiliou na fitoestabilização.

Em contraposição, King *et al.* (2008) testaram no campo quatro espécies de *Eucalyptus* para a fitorremediação do rejeito de ouro da mina Stawell, na Austrália. Foram aplicadas combinações de solo superficial, biossólidos e rocha

estéril, e constatou-se que a vegetação analisada era adequada à fitoestabilização de arsênio. Níveis de arsênio foram identificados nas árvores, em média, abaixo dos limites fitotóxicos. Posteriormente, Sanchez-Palacios *et al.* (2013) testaram cinco espécies de *Eucalyptus* para a fitorremediação da mesma estrutura. Um sistema de irrigação foi estabelecido, a fim de garantir a sobrevivência da planta durante a estação de estiagem. Para a remediação do arsênio, foram analisados a taxa de sobrevivência, o volume do caule, a acumulação de arsênio e a relação entre seu crescimento e retenção. As espécies demonstraram diferenças significativas em seu desenvolvimento e na concentração de arsênio nas folhas, quando se almejavam os menores níveis dessa concentração com o intuito de minimizar a contaminação de cadeias alimentares. Os autores indicaram a necessidade de avaliação no longo termo para observar mudanças nas concentrações.

Sekhar e Jakhu (1983) relataram a fitoextração de metais pesados em rejeito de cobre e zinco, inviabilizando a área para fins agrícolas, mas prevenindo a contaminação dos lençóis freáticos. A técnica de estaquia proporcionou bons resultados, sendo mais eficaz do que a plantação direta de sementes ou mudas. Segundo os pesquisadores, as sementes são menos resistentes às adversidades do rejeito, e as raízes das mudas podem ser danificadas ao longo da transposição.

Impactos da descaracterização

Seis artigos abordam os impactos ambientais e sociais das obras de descaracterização de uma barragem de rejeitos, dos quais dois se enquadram em “Revegetação” e quatro em “Fitorremediação”.

Conforme Redente (2009), o fechamento de seis barragens de rejeitos de ouro, prata, cobre, chumbo e zinco no Colorado, Estados Unidos, contemplou a revegetação das estruturas, mas impactos adversos foram negligenciados pela companhia de mineração ao empregar “métodos tradicionais de recuperação ambiental”. Sem citar exemplos, o autor explicou que esses métodos envolvem a retirada e a realocação de extenso volume de rejeitos e/ou a utilização de ampla quantidade de materiais de construção para reter os resíduos. Dessa maneira, o transporte dos rejeitos envolveria milhares de viagens de caminhões nos distritos, causando distúrbios, aumento considerável no tráfego e, conseqüentemente, substanciais impactos na comunidade local. Além disso, Redente (2009) afirmou que a importação de materiais para cobrir a barragem causaria danos ao local da fonte desses materiais, além de impactar a comunidade local com fluxo de caminhões.

Após demonstrarem o sucesso de revegetação pela aplicação combinada de solo superficial e uma rede patenteada, que contém sementes e materiais que retêm água, Yan, Zhao e Sun (2013) defenderam essa técnica em detrimento do uso somente de solo superficial. O estudo da aplicação dessa técnica em uma barragem de rejeitos de ferro no subúrbio de Pequim, China, não só resultou em maior quantidade de espécies, mas também evitou o uso de grande volume de solo superficial. De acordo com os autores, o tratamento com solo superficial envolve severos danos no local de remoção do recurso, que é escasso.

Segundo Karaca, Cameselle e Reddy (2018), a reutilização de rejeitos como material de construção, por exemplo para a pavimentação de vias, aumenta a exposição ao material particulado desses rejeitos e, conseqüentemente, eleva os riscos de ocorrência de problemas de saúde na população e de contaminação de ecossistemas. Os autores explicaram que os danos referentes à escavação e ao transporte são mínimos quando pouca quantidade desses resíduos é manipulada. Entretanto essa alternativa de fechamento é inviável, visto o grande volume

de rejeito nas barragens. Dessa maneira, foi defendida a tecnologia *in situ* de fitorremediação, a qual imobiliza os materiais, reduz a lixiviação de metais e a biodisponibilidade. Contudo, Karaca, Cameselle e Reddy (2018) ressaltaram que há risco de contaminação de cadeias alimentares por meio da fitoextração, logo a fitoestabilização foi preferível.

Similarmente, Ortiz-Calderón, Alcaide e Kao (2008) analisaram uma barragem de rejeitos de cobre no Chile, após dez anos de revegetação. As espécies sobreviventes demonstraram capacidade de fitoestabilização e fitoextração, esta evidenciada pelos altos níveis de cobre nas folhas e caules. Todavia, os autores afirmaram que a fitoextração não é adequada, pois poderia introduzir o metal em cadeias alimentares caso a vegetação fosse consumida por animais.

O fechamento da barragem de rejeitos de ouro da mina Stawell, situada na Austrália, também empregou a fitorremediação de arsênio. Sanchez-Palacios *et al.* (2013) testaram espécies de *Eucalyptus* e identificaram elevada concentração de arsênio nas folhas. Os autores afirmaram haver potencial risco de transferência do elemento para cadeias alimentares, apesar de ressaltarem a escassez de estudos desse impacto.

Já Di Carlo, Boulemant e Courtney (2019) analisaram três barragens de resíduos de bauxita na Europa, a fim de estudar a fitorremediação. Altos níveis de alguns elementos foram constatados na vegetação, como alumínio, sódio, ferro, cromo e vanádio, decorrentes da fitoextração. Os autores concluíram que essa concentração preocupa quanto ao potencial de contaminação de cadeias alimentares.

Conceito de descaracterização e termos afins, segundo a literatura

Vinte e quatro artigos apresentaram definições, exemplos ou objetivos dos termos *rehabilitation*, *remediation*, *reclamation*, *decommissioning* e *closure*, que são inter-relacionados mas não totalmente equivalentes a “descaracterização”. Os artigos apresentam contradições e sobreposições nas definições desses termos em inglês, como no uso da expressão mais adequada para se referir ao fechamento definitivo de barragens de rejeitos. De maneira geral, utilizaram *closure* como o processo de fechamento da barragem, que inclui *decommissioning*, ou a desativação das infraestruturas de operação; e *reclamation*, obras de recuperação ambiental. Esta, por sua vez, inclui *remediation*, remediação mediante redução ou confinamento de contaminantes no rejeito, água subterrânea, água superficial ou solo contaminados pelos resíduos; e *rehabilitation*, ou reabilitação, tornar a área apta para novo uso (Tabela 3). Note-se que outras definições sobre esses termos podem ser encontradas em outras fontes, como guias de boas práticas e legislações.

CONCLUSÕES

O objetivo da descaracterização de barragens de rejeito é reduzir riscos para as comunidades e para o meio ambiente. A revisão sistemática encontrou estudos sobre fechamento de barragens de rejeitos que descrevem e discutem as técnicas empregadas para a estabilização física e química dessas estruturas, mas há poucas pesquisas sobre os impactos ambientais das obras necessárias para garantir a estabilidade. Ressalta-se assim a necessidade de aprofundamento do tema diante do grande número de barragens a serem desativadas no Brasil nos próximos anos, particularmente aquelas a serem simultaneamente descaracterizadas no Quadrilátero Ferrífero.

Na literatura internacional, ações de “descaracterização” relacionam-se com *decommissioning* (desativação), *rehabilitation* (reabilitação), *reclamation* (recuperação), *remediation* (remediação) e *closure* (fechamento). Essas ações geralmente visam à estabilização física e química de uma estrutura de contenção de rejeitos, mas não necessariamente a descaracterizá-la como barragem, ou seja, a que ela deixe de ter as características de barragem. O assunto é pouco explorado na literatura internacional e a experiência brasileira que resultará do atendimento à nova legislação, se devidamente analisada e documentada, contribuirá sobremaneira para o avanço do conhecimento e das técnicas de

fechamento de barragens de rejeito, com potencial aplicação também para outros tipos de barragens, além das alteadas a montante.

CONTRIBUIÇÕES DOS AUTORES

Massignan, R. S.: Curadoria de Dados, Análise Formal, Obtenção de Financiamento, Investigação, Metodologia, Recursos, Visualização e Escrita - Primeira Redação; Sánchez, L. E.: Conceituação, Metodologia, Administração do Projeto, Supervisão, Validação e Escrita - Revisão e Edição.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM); Ministério de Minas e Energia. *Relatório quantitativo*. Brasília, DF: ANM, 2021 Disponível em: <https://app.anm.gov.br/SIGBM/Publico/Estatistica>. Acesso em: 15 mai. 2021.
- ARAÚJO, G. S.; DINIZ, I. N. A.; SANTOS, P. R. dos. Aplicação de controles de prevenção e mitigação para descomissionamento de barragem de rejeito. *In: Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental, 9; Congresso Brasileiro de Geossintéticos, 8, 2019, São Carlos. Anais [...]*. São Carlos: Associação Brasileira de Geossintéticos, 2019. Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2019, p. 487 - 493.
- BAKHTAVAR, E.; SHAHRIAR, K.; OSANLOO, M. Old tailings rehabilitation with regard to environmental impacts at the Mooteh gold mine. *In: International Scientific Conference on Modern Management of Mine Producing, Geology and Environmental Protection 9, 2006, Albená. Anais [...]*. Albená: SGEM, 2006, p. 3 - 8.
- BARNEKOW, U.; JAKUBICK, A. T.; PAUL, M.; JAAKSOO, R.; KAASIK, T. Stabilization and Decommissioning of the Sillamäe Radioactive Tailings. *In: International Conference on Tailings and Mine Waste, 10. Anais [...]*. Vail, CO: USA, 2002, p. 487 - 494.
- BELLENFANT, G.; GUEZENNEC, A. G.; BODENAN, F.; D'HUGUES, P.; CASSARD, D. Reprocessing of mining waste: combining environmental management and metal recovery?. *In: Proceedings of the Eighth International Conference on Mine Closure, 9, 2013, Cornualha. Anais [...]*. Cornualha: Australian Centre for Geomechanics, p. 571 - 582, 2013. https://doi.org/10.36487/ACG_rep/1352_48_Bellenfant
- BJELKEVIK, A. G. ICOLD - sustainable design and post-closure performance of tailings dams. *In: Proceedings of the Sixth International Conference on Mine Closure, 9, 2011, Alberta. Anais [...]*. Alberta: Australian Centre for Geomechanics, 2011. p. 353 - 359. https://doi.org/10.36487/ACG_rep/1152_37_Bjelkevik
- CASH, A. E.; URRUTIA, P.; WILSON, G. W.; ROBERTSON, J. A 2011 update for the single-layer desulphurised tailings cover completed in 1999 at Detour Gold. *In: Proceedings of the Seventh International Conference on Mine Closure, 9, 2012, Perth. Anais [...]*. Perth: Australian Centre for Geomechanics, p. 149-162, 2012. https://doi.org/10.36487/ACG_rep/1208_15_Cash
- CROSS, A. T.; IVANOV, D.; STEVENS, J. C.; SADLER, R.; ZHONG, H.; LAMBERS, H.; DIXON, K. W. Nitrogen limitation and calcifuge plant strategies constrain the establishment of native vegetation on magnetite mine tailings. *Plant Soil*, n. 461, p. 181 - 201, 2021. <https://doi.org/10.1007/s11104-019-04021-0>
- DE SOUZA, D. O.; MONTEIRO, F. F.; DE OLIVEIRA, F. H. L.; DE AGUIAR, M. F. P. Estudo da recuperação e aproveitamento de finos de minério em um reservatório de rejeitos. *In: Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental, 9; Congresso Brasileiro de Geossintéticos, 8, 2019, São Carlos. Anais [...]*. São Carlos: IGS-Brasil/ABMS, 2019, p. 41 - 48
- DI CARLO, E.; BOULLEMANT, A.; COURTNEY, R. Soil quality and vegetation performance indicators for sustainable rehabilitation of bauxite residue disposal areas: a review. *Soil Research*, v. 57, n. 5, p. 419 - 446, 2019. <https://doi.org/10.1071/SR18348>
- DIMISKOVSKA, B.; ZEQRIRI, K. Basic terms in managing of environment protection against tailing dam. *International Journal of Environment and Waste Management*, v.16, n.3, p. 187 - 196, 2015. <https://doi.org/10.101504/IJEW2015073021>
- DOMINGO, J. P. T.; DAVID, C. P. C. Soil amelioration potential of legumes for mine tailings. *Philippine Journal of Science*, v. 143, n. 1, p. 1 - 8, 2014.
- ETHIER, M. P.; BUSSIÈRE, B.; AUBERTIN, M.; MAQSUD, A.; DEMERS, I. In situ evaluation of performance of reclamation measures implemented on abandoned reactive tailings disposal site. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 55, n. 12, p. 1742 - 1755, 2018. [dx.doi.org/10.1139/cgj-2016-0699](https://doi.org/10.1139/cgj-2016-0699)
- FIGUEIREDO, J.; VILA, M. C.; FIÚZA, A. A sustainable tailings reprocessing project: a case of study in Portugal. *In: International Multidisciplinary Scientific GeoConference, 18, 2018, Albená. Anais [...]*. Albená: SGEM, 2018. p. 867 - 875. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/328727646_A_SUSTAINABLE_TAILINGS_REPROCESSING_PROJECT_A_CASE_OF_STUDY_IN_PORTUGAL. Acesso em: 24 fev. 2022.
- GARGA, V. K.; DE LA TORRE, M. Emergency remediation of instability at Caudalosa tailings dam, Peru: a case history. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 39, n. 5, p. 1193 - 1200, 2002. [dx.doi.org/10.1139/t02-045](https://doi.org/10.1139/t02-045)
- GEORGESCU, P. D.; POPESCU, M. Radiological risk assessment and ecological rehabilitation for a Romanian uranium tailing pond. *In: Geocongress 2008: Geosustainability and Geohazard Mitigation, 3, 2008, Nova Orleans. Anais [...]*. Nova Orleans: n. 178, p. 1171 - 1178, 2008. <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/40971%28310%29146>

- GLOBAL TAILINGS REVIEW (GTR). *Padrão global da indústria para a gestão de rejeitos*: minuta final. International Council on Mining and Metals (ICMM), United Nations Environment Program (UNEP), Principles for Responsible Investment (PRI), 2020, 42 p.
- GUNSINGER, M. R.; ANDRYUCHOW, B.; BECKER, E. Closure of uranium tailings facilities: environmental considerations, regulatory framework and conceptual options. *In: Proceedings of the Eighth International Conference on Mine Closure*, 9, 2013, Cornwallha. *Anais [...]*. Cornwallha: Australian Centre for Geomechanics, 2013, p. 149 - 158. https://doi.org/10.36487/ACG_rep/1352_13_Gunsinger
- HUDEČEK, V.; CERNÁ, K.; GEMBALOVÁ, L.; VOTOCE, J. Completion and utilization of the rehabilitated central tailing heap of Jan Šverma mine in Žacléř. *Acta Montanistica Slovaca*, v. 21, n. 1, p. 129 - 138, 2016. <http://actamont.tuke.sk/pdf/2016/n2/6hudecek.pdf>
- JUSTO, J. L.; MORALES-ESTEBAN, A.; JUSTO, E.; JIMÉNEZ-CANTIZANO A.; DURAND, P.; VÁZQUEZ-BOZA, M. The dry closure of the Almagrera tailings dam: detailed modelling, monitoring results and environmental aspects. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, v. 78, n. 5, p. 3175 - 3189, 2019. <https://doi.org/10.1007/s10064-018-1342-2>
- KARACA, O.; CAMESELLE, C.; REDDY, K. R. Mine tailing disposal sites: contamination problems, remedial options and phytocaps for sustainable remediation. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, v. 17, n. 1, p. 205 - 228, 2018. <https://doi.org/10.1007/s11157-017-9453-y>
- KING, D. J.; DORONILA, A. I.; FEENSTRA, C.; BAKER, A. J. M.; WOODROW, I. E. Phytostabilisation of arsenical gold mine tailings using four Eucalyptus species: growth, arsenic uptake and availability after five years. *Science of the Total Environment*, v. 406, n. 1 - 2, p. 35 - 42, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.07.054>
- LABED, V.; ROBÉ, M. C.; BENEITO, A.; MAUREL, J. M.; RICHON, P. Rehabilitation of a uranium-ore processing residues storage site at Le Bouchet, Paris region, France. *Environment International*, v. 22, n. 1, p. 237 - 241, 1996.
- LACY, H. Closure and rehabilitation tailings storage facilities. *In: ADAMS, M. D. (ed) Developments in mineral processing*. Amsterdã: Elsevier, 2005, v. 15, p. 233 - 250. [https://doi.org/10.1016/S0167-4528\(05\)15011-X](https://doi.org/10.1016/S0167-4528(05)15011-X)
- MARTÍNEZ-PAGÁN, P.; MENDEZ, M. O.; MAIER, R. M. A multidisciplinary study for mining landscape reclamation: a study case on two tailing ponds in the Region of Murcia (SE Spain). *Physics and Chemistry of the Earth*, v. 36, n. 16, p. 1331 - 1344, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2011.02.007>
- MCCABE, O. M.; OTTE, M. L. The wetland grass *Glyceria fluitans* for revegetation of metal mine tailings. *Wetlands*, v. 20, n. 3, p. 548 - 559, 2000. Disponível em: [https://link.springer.com/article/10.1672/0277-5212\(2000\)020%3C0548:TWGFFR%3E2.O.CO;2](https://link.springer.com/article/10.1672/0277-5212(2000)020%3C0548:TWGFFR%3E2.O.CO;2). Acesso em: 24 fev. 2022.
- MENDEZ, M. O.; MAIER, R. M. Phytoremediation of mine tailings in temperate and arid environments. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, v. 7, n. 1, p. 47 - 59, 2008. <https://doi.org/10.1007/s11157-007-9125-4>
- MERKEL, G.; LINDER, S. Design, construction and monitoring of the final cover on Wismut's Truenzig tailings facility. *In: Proceedings of the Eighth International Conference on Mine Closure*, 9, 2013, Cornwallha. *Anais [...]*. Cornwallha: Australian Centre for Geomechanics, p. 183 - 194, 2013. https://doi.org/10.36487/ACG_rep/1352_16_Merkel
- MULLIGAN, D.; GILLESPIE, M. J.; GRAVINA, A. J.; CURREY, N. A. An assessment of the direct revegetation strategy on the tailings storage facility at Kidston Gold Mine, North Queensland, Australia. *In: Proceedings of the 1st International Conference on Mine Closure*, 9, 2006, Perth. *Anais [...]*. Perth: Australian Centre for Geomechanics, p. 371 - 381, 2006. https://doi.org/10.36487/ACG_repo/605_30
- MYLONA, E.; XENIDIS, A.; CSÖVÁRI, M.; NÉMETH, G. Application of dry covers for the closure of tailings facilities. *Land Contamination and Reclamation*, v. 15, n. 2, p. 163 - 182, 2007. <https://doi.org/10.2462/09670513.849>
- NAMBA, M.; AKINAGA, P.; CUNHA, I.; VINUEZA, G.; FONTES, G.; NEGRO JR, A. Wetlands: a solution to the decommissioning of mining tailings dams. *In: Proceedings of the 5th International Conference on Mine Closure*, 11, 2010, Viña del Mar. *Anais [...]*. Viña del Mar: Australian Centre for Geomechanics, p. 575, 2010.
- NORLAND, M. R.; VEITH, D. L. Revegetation of coarse taconite iron ore tailing using municipal solid waste compost. *Journal of Hazardous Materials*, v. 41, n. 2 - 3, p. 123 - 134, 1995.
- NURTJAHYA, E.; SETIADI, D.; GUHARDJA, E.; SETIADI, Y. M. Establishment of four native tree species for potential revegetating of tin-mined land in Bangka Island, Indonesia. *In: Proceedings of the third International Conference on Mine Closure*, 9, 2009, Perth. *Anais [...]*. Perth: Australian Centre for Geomechanics, p. 751 - 758, 2009. https://doi.org/10.36487/ACG_repo/852_70
- ORTIZ-CALDERÓN, C.; ALCAIDE, Ó.; KAO, J. Copper distribution in leaves and roots of plants on a copper mine-tailing storage facility in northern Chile. *Revista Chilena de História Natural*, v. 81, n. 4, p. 489 - 499, 2008. <http://dx.doi.org/10.4067/S0716-078X20080004000004>
- PANG, K. L.; LACY, H. W. B.; HAYMONT, R.; POTTS, R. Resolving challenges in tailings closure in semi-arid deserts - a case study into the decommissioning and rehabilitation of the Tanami Mine Three Cell tailings storage facility. *In: Proceedings of the Fourth International Conference on Mine Closure*, 9, 2009, Perth. *Anais [...]*. Perth: Australian Centre for Geomechanics, p. 329 - 341, 2009. https://doi.org/10.36487/ACG_repo/908_25/
- POZZO, S. D.; ANDRADE, C.; WATES, J. A.; GRIFFIN, B. J. Closure of Tailings Impoundments - Chilean Experiences. *In: Proceedings of the Fourth International Conference on Mine Closure*, 9, 2006, Perth. *Anais [...]*. Perth: Australian Centre for Geomechanics, p. 191 - 197, 2006. https://papers.acg.uwa.edu.au/p/605_11_Dal Pozzo/
- PREWITT, J. M.; PURADYATMIKA, P. Tailings reclamation trials at PT Freeport Indonesia in Mimika, Papua, Indonesia. *In: Proceedings of the Seventh International Conference on Mine Closure*, 9, 2012, Brisbane. *Anais [...]*. Brisbane: Australian Centre for Geomechanics, p. 173, 2012. https://papers.acg.uwa.edu.au/p/1208_17_Puradyatmika/
- PRITCHARD, J.; JENSEN, T.; WELSH, D. Options for management and closure of tailings storage facilities. *Engineering and Mining Journal*, v. 211, n. 2, p. 72 - 75, 2010.
- REDENTE, E. F. Direct revegetation of acidic mine tailings at the Idarado mine site in Southwest Colorado. *In: Annual Meetings of the American Society of Mining and Reclamation*, 26; Billings Land Reclamation Symposium, 11, 2009. *Anais [...]*. v. 2, p. 1066 - 1085, 2009.
- REGNIER, T. C.; MOKGALAKA, N. S.; MEMEL, O.; LAING, M. D. Trichoderma harzianum as a tool for reaching suitable growth and vegetation cover on mine tailings. *In: Proceedings of the 6th International Conference on Mine Closure*, 9, 2011, Alberta. *Anais [...]*. Alberta: Australian Centre for Geomechanics, p. 85 - 91, 2011. https://papers.acg.uwa.edu.au/p/1152_10_Regnier
- RENSBURG, L. V. A. N.; MABOETA, M. S.; MORGENTHAL, T. L. Rehabilitation of co-disposed diamond tailings: growth medium rectification procedures

and indigenous grass establishment. *Environmental Sciences*, p. 101 – 113, 2003. <https://doi.org/10.1023/B:WATE.0000022943.27442.2a>

RIBEIRO, R. A.; GIANNINI, T. C.; GASTAUER, M.; AWADE, M.; SIQUEIRA, J. O. Topsoil application during the rehabilitation of a manganese tailing dam increases plant taxonomic, phylogenetic and functional diversity. *Journal of Environmental Management*, v. 227, p. 386 – 394, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.08.060>

SÁNCHEZ, L. E.; SILVA-SÁNCHEZ, S. S.; NERI, A. C. *Guia para planejamento do fechamento de mina*. Brasília: Instituto Brasileiro de Mineração, 2013, 224 p.

SANCHEZ-PALACIOS, J. T.; DORONILA, A. I.; BAKER, A. J. M.; WOODROW, I. E. Performance of eucalyptus species on capped arsenic-rich gold mine tailings in the Victorian Goldfields, Australia. *In: Proceedings of the 8th International Conference on Mine Closure*, 9., 2013, Cornwallha. *Anais [...]*. Cornwallha: Australian Centre for Geomechanics, p. 331 – 344, 2013. https://papers.acg.uwa.edu.au/p/1352_27_Doronila/

SAWATSKY, L.; COOPER, D. L.; MCROBERTS, E.; FERGUSON, F. Strategies for reclamation of tailings impoundments. *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*, v. 10, p. 131 – 134, 1996. <https://doi.org/10.1080/09208119608964816>

SEKHAR, D. M. R.; JAKHU, M. R. Primary vegetative growth on an old tailings dam, Zawar mines. *Minerals and the Environment*, v. 5, n. 4, p. 128 – 132, 1983. <https://doi.org/10.1007/BF02093334>

SÖZEN, S.; ORHON, D.; DINÇER, H.; ATESOK, G.; BASTÜRKCÜ, H.; YALÇM, T.; ÖZNESİL, H.; KARACA, C.; ALH, B.; DULKADIROĞLU, H.; YAGCI, N. Resource recovery as a sustainable perspective for the remediation of mining wastes: rehabilitation of the CMC mining waste site in Northern Cyprus. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, v. 76, n. 4, p. 1535 – 1547, 2017. <https://doi.org/10.1007/s10064-017-1037-0>

SPAIN, A.; TIBBETT, M. Coal mine tailings: development after revegetation with salt tolerant tree species. *In: Proceedings of the 7th International Conference on Mine Closure*, 9, 2012, Brisbane. *Anais [...]*. Brisbane: Australian Centre for Geomechanics, p. 551 – 562, 2012. https://papers.acg.uwa.edu.au/p/1208_47_Spain/

TAPIA, Y.; BUSTOS, P.; SALAZAR, O.; CASANOVA, M.; CASTILLO, B.; ACUÑA, E.; MASAGUER, A. Phytostabilization of Cu in mine tailings using native plant *Carpobrotus aequilaterus* and the addition of potassium humates. *Journal of Geochemical Exploration*, v. 183, p. 102 – 113, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gexplo.2017.10.008>

WANG, L.; JI, B.; HU, Y.; LIU, R.; SUN, W. A review on in situ phytoremediation of mine tailings. *Chemosphere*, v. 184, p. 594 – 600, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.06.025>

WILLIAMS, D.; KING, G. Capping of a surface slurried coal tailings storage facility. *In: Proceedings of the 11th International Conference on Mine Closure*, 3., 2016, Perth. *Anais [...]*. Perth: Australian Centre for Geomechanics, p. 263 – 275, 2016. https://papers.acg.uwa.edu.au/p/1608_18_Williams/

WOOSAREE, J.; ANDERSON, H. Revegetation of tailings sand without a soil cover in the Alberta oil sands. *In: Proceedings of the 7th International Conference on Mine Closure*, 9, 2012, Brisbane. *Anais [...]*. Brisbane: Australian Centre for Geomechanics, p. 197 – 065, 2012. https://papers.acg.uwa.edu.au/p/1208_19_Woosaree/

XIE, L.; ZYL, D. van. Distinguishing reclamation, revegetation and phytoremediation, and the importance of geochemical processes in the reclamation of sulfidic mine tailings: a review. *Chemosphere*, v. 252, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126446>

YAN, D.; ZHAO, F.; SUN, O. J. Assessment of vegetation establishment on tailings dam at an iron ore mining site of Suburban Beijing, China, seven years after reclamation with contrasting site treatment methods. *Environmental Management*, v. 52, n. 3, p. 748 – 757, 2013. <https://doi.org/10.1007/s00267-013-0092-y>

