



LOGÍSTICA REVERSA: POSSIBILIDADES E DESAFIOS PARA O SETOR MINERÁRIO

Nathalie Barbosa Reis Monteiro

Doutora e mestre em Desenvolvimento de Meio Ambiente pela Universidade Federal do Piauí (UFPI). Graduada em Administração Geral pela Faculdade Estácio de Sá de Ourinhos. Docente e pesquisadora vinculada aos Cursos Superiores de Tecnologia EaD do Centro de Ciências Sociais e Aplicadas (CCSA) da Universidade Presbiteriana Mackenzie. Membro do Colegiado do Curso Tecnológico de Gestão em Logística da Universidade Presbiteriana Mackenzie.

São Paulo, v. 3,
n. 1, p. 7-32,
jan./jun. 2021

RESUMO

A crescente demanda por produtos industrializados acarreta aumento na extração de recursos naturais, especialmente minerais. A atividade minerária gera impactos ambientais, cujos efeitos podem se prolongar por muitos anos. Os resíduos e rejeitos descartados são importantes fontes de impacto da mineração. Fatores de ordem econômica, social e ambiental apontam para a insustentabilidade desse modelo linear de economia. Entre as soluções apresentadas, estão o modelo de economia circular e a logística reversa. O objetivo deste artigo é discutir, com base nas experiências descritas na literatura científica, de que maneira a logística reversa pode ser implementada na mi-

neração para que haja compatibilidade com os princípios da economia circular. Foi utilizado o Portal de Periódicos Capes para a busca de trabalhos que se relacionam ao assunto. Por meio da análise dos artigos encontrados, foi possível identificar as dificuldades e possibilidades e estabelecer as diretrizes mínimas para a implementação da logística reversa no setor minerário.

Palavras-chave: Mineração; Economia circular; Ciclo de vida.

1. INTRODUÇÃO

A mineração é uma atividade importante para a economia de qualquer país, pois gera insumos para diversas cadeias produtivas. O setor, no entanto, causa impactos ambientais, tais como: exaustão dos recursos naturais, mudanças no ambiente, emissão de gases e de material particulado, alta produção de ruídos, contaminação do solo e cursos de água, entre outros (Monteiro; Moita Neto; Silva, 2018). Os impactos socioeconômicos estão ligados à dinamização da economia regional, uma vez que essas indústrias contribuem gerando empregos, promovendo a circulação de capital, movimentando o comércio local, além de incrementar a arrecadação do estado e do município por meio do pagamento de impostos (Takano; Flores; Lima, 2016).

Em 2015, a Organização das Nações Unidas (ONU) lançou os 17 Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS), cujo propósito é estabelecer um plano de ação para as pessoas, para o planeta e para a prosperidade, em prol do desenvolvimento sustentável (ONU, 2020). Dentre os ODS, estão aqueles relacionados à indústria, inovação e infraestrutura (ODS 9), cidade e comunidades sustentáveis (ODS 11) e consumo e produção sustentáveis (ODS 12), que podem ser alcançados com a colaboração das indústrias mineradoras para o cumprimento da agenda 2030. Assim, é preciso que sejam estudados os processos envolvidos na produção mineral que possibilitem a proposição de cenários com a incorporação de estratégias para uma produção mais sustentável, do ponto de vista ambiental, no setor (Monteiro; Silva; Moita Neto, 2019).

A exploração, o beneficiamento e a utilização de produtos provenientes da mineração causam diversos impactos ambientais. Um dos principais impactos está relacionado à perda de material, durante o processo, no decorrer da cadeia produtiva. A logística reversa pode contribuir com a implantação de uma economia mais próxima à circular, na mineração, por meio da elaboração de cenários que antevêm o aproveitamento dos resíduos, a diminuição da exploração das jazidas naturais e o aumento da eficiência dos processos produtivos. O cenário ideal será aquele que gere desenvolvimento econômico/ambiental/social.

O conceito de economia circular, embora seja objeto de inúmeras controvérsias, propõe a reutilização dos resíduos, dentro de uma cadeia produtiva, reduzindo o desperdício, gerando ganhos econômicos, sociais e ambientais. O conceito pode ser aplicado a operações de mineração, visando a gestão eficiente dos resíduos ao longo do ciclo de vida da mina, por meio do desenvolvimento de caminhos viáveis para a criação de novas cadeias de valor e aceleração de soluções jurídicas, econômicas e técnicas para o benefício da sociedade – indústria, governo, comunidade e meio ambiente. A logística reversa, estabelecida pela Política Nacional dos Resíduos Sólidos na Lei n. 12.305/2010 (Brasil, 2010) é uma das ferramentas que pode auxiliar as organizações na implementação da economia circular. No entanto, é necessário considerar as dimensões locais, regionais e globais relacionadas ao gerenciamento de resíduos de mineração; os impactos ambientais espaciais e temporais resultantes da produção de resíduos; e como a indústria de mineração pode contribuir para a emergente economia circular.

A logística reversa, no contexto da economia circular, possibilita estabelecer uma mudança de paradigma, em que os materiais são extraídos, beneficiados, consumidos e descartados, para um modelo econômico/industrial no qual há aproveitamento dos resíduos, por meio do aprimoramento da eficiência dos processos produtivos. Rigamonti *et al.* (2017) atestam que, no contexto das estratégias da economia circular, há formas de garantir que a

recuperação de recursos não represente encargos adicionais ao meio ambiente e que os impactos evitados sejam, sistematicamente, contabilizados.

Com o auxílio da logística reversa, é possível estabelecer mudanças no desempenho ambiental das indústrias de mineração, de modo que todo o processo produtivo que envolve a utilização de minerais possa incorporar o conceito de economia circular, proporcionando ganhos ambientais, nesse setor, por meio de cenários mais próximos da economia circular.

1.1 Economia circular

O mundo tem sido guiado por um conceito econômico linear, em que os recursos são extraídos da natureza, processados, transformados em produtos e descartados após o uso. O desafio é transformar a economia linear em uma economia mais próxima da circular, em que todos os resíduos gerados da utilização de produtos possam ser reaproveitados na cadeia produtiva.

A economia circular é considerada regenerativa e restaurativa, pois mantém produtos em seu mais alto nível de utilidade e valor. Trata-se de um ciclo contínuo de desenvolvimento, baseado no *design* Cradle to Cradle, isto é, do berço ao berço, que elimina a ideia de resíduos, pois os leva para o início da cadeia, como matéria-prima. O conceito de economia circular defende a redução da extração de recursos primários em favor do material secundário fluindo através de *loops* internos. Os fluxos circulares na economia visam manter os recursos em uso o maior tempo possível e limitar a eliminação final de resíduos (Gejer; Tennembaum, 2017).

No entanto, esse conceito vai além do simples reaproveitamento dos resíduos e é baseado em três princípios: a preservação e o aprimoramento do capital natural, com o objetivo de controlar estoques finitos e equilibrar os fluxos de recursos renováveis; a otimização dos recursos, para que os produtos e materiais possam circular no mais alto nível de utilização, durante o maior tempo possível, tanto no ciclo técnico quanto no biológico; e a estimulação da efetividade do sistema, revelando e excluindo as externalidades negativas desde o início do ciclo produtivo (Santiago, 2016).

Nas últimas décadas, práticas de gestão da cadeia de suprimentos foram desenvolvidas para tentar reduzir as consequências negativas dos processos de produção e consumo no meio ambiente. Paralelamente a isso, o discurso da economia circular foi propagado na literatura de economia industrial e de produção e, ultimamente, nos negócios e na prática (Nasir *et al.*, 2017). Os princípios da economia circular enfatizam a ideia de transformar os produtos de forma que existam relações viáveis entre os sistemas ecológico e econômico (CE100 Brasil, 2017).

Os resultados do desenvolvimento econômico são maior prosperidade e mais qualidade de vida, que podem ser alcançados por meio de inovações sustentadas, melhora na infraestrutura, educação e oportunidades para a sociedade. Nesse contexto, um cenário favorável à prática de uma economia mais circular pode contribuir para o desenvolvimento econômico, promovendo uma sociedade mais justa, uma vez que a melhoria na gestão dos processos produtivos diminui o desperdício, aumentando o nível de rendimento econômico, refletindo na melhoria da qualidade do meio ambiente e, conseqüentemente, da qualidade de vida da população.

Uma das ferramentas para aplicação da economia circular é a simbiose industrial, cujo conceito é a criação de parques industriais com resíduo zero. É uma iniciativa que tem levado diversas empresas a rever suas estratégias, motivadas pela redução dos custos de disposição de resíduos e as preocupações sobre a degradação ambiental. O principal atrativo desse conceito é a relação mutualmente benéfica entre empresas integrantes de um ecossistema industrial, em que uma indústria aproveita os resíduos de outra como novos insumos para processos produtivos, buscando a harmonia entre os aspectos sociais, ambientais e econômicos (Santolin; Caten, 2015).

Outra maneira de melhorar o desempenho das empresas em direção a uma economia mais circular é a utilização de tecnologias da Indústria 4.0, como a Internet das Coisas (sensores, código de barras, *smartphones*), os sistemas *cyberfísicos* (controladores e sistemas de sensores), a fabricação na nuvem (*internet*, comércio virtual) e a fabricação aditiva (impressoras 3D).

Os avanços nas tecnologias de manufatura digital possibilitam a circularidade mais eficiente dos recursos na cadeia produtiva e contribuem para a tomada de decisão, tendo como base a gestão sustentável das operações nas indústrias (Jabbour *et al.*, 2018). Um exemplo da aplicação dessa tecnologia na mineração é o uso de robôs em cavernas e áreas de risco, bem como nos ensaios laboratoriais, manuseio de explosivos e montagem e manutenção de equipamentos (Cota *et al.*, 2017).

Assim, com base na Lei n. 12.305/2010 (Brasil, 2010), utilizando os conceitos e princípios da logística reversa, é possível vislumbrar as possibilidades e desafios da gestão dos resíduos de mineração em direção à circularidade nos processos produtivos da atividade minerária.

1.2 Entraves na aplicação da economia circular

Kirchherr, Reike e Hekker (2017) atestam que a economia circular é frequentemente representada como uma combinação de atividades de redução, reutilização e reciclagem, ao passo que, muitas vezes, não é enfatizada a necessidade de uma mudança sistêmica. Além disso, as principais definições de economia circular demonstram poucas ligações explícitas do conceito com o desenvolvimento sustentável.

O objetivo da economia circular está relacionado, principalmente, à prosperidade econômica aliada à qualidade ambiental, no entanto, o impacto na equidade social e nas gerações futuras é, ainda, pouco enfatizado. Assim, é necessário que os modelos de negócios e os consumidores tornem-se facilitadores da aplicação da economia circular para que não haja, eventualmente, o esgotamento do conceito (Kirchherr; Reike; Hekker, 2017).

Um dos desafios na aplicação da economia circular é a disponibilidade de parques industriais onde as indústrias possam compartilhar seus resíduos com outras, fazendo os produtos circularem dentro da cadeia de valor o maior tempo e com o maior aproveitamento possível (Bellantuono; Carbonara; Pontrandolfo, 2017). A logística de transporte de resíduos de uma indústria

para outra pode tornar o reaproveitamento dos materiais inviável, em função da localização e da distância entre as indústrias envolvidas.

Em relação à reciclagem, as dificuldades estão nos âmbitos tecnológico e econômico. Muitas vezes, as melhores técnicas não estão disponíveis a preços viáveis, tornando a reciclagem um processo economicamente desinteressante. É preciso, também, quantificar a demanda de água e energia do processo de reciclagem em relação à extração da matéria-prima bruta, além do custo de máquinas e equipamentos, a fim de avaliar a sua viabilidade econômica e ambiental.

Entre os problemas enfrentados pelos países em desenvolvimento, como a China, está o grande volume de resíduos recebidos dos países desenvolvidos para reciclagem, que, muitas vezes, são de baixa qualidade. Em uma economia circular global, os países desenvolvidos devem ajudar os países em desenvolvimento a lidar com as questões ambientais causadas pela reutilização de resíduos, transferindo tecnologias de gestão e reciclagem de resíduos e investindo em treinamento de funcionários locais para mitigar possíveis riscos ambientais. As exportações de materiais recicláveis dos países desenvolvidos para os que estão em desenvolvimento não devem ser, simplesmente, a transferência de poluição, ao contrário, devem ser parte da busca de uma economia mais circular, em nível global (Liu; Adams; Walker, 2018).

Outro fator determinante na busca pela aplicação da economia circular é a cooperação do governo, por meio de incentivos fiscais que possam reduzir as barreiras tarifárias no setor. A tributação normalmente representa um alto custo para a mineração, que é o primeiro elo na cadeia produtiva de diversos setores industriais. Na Austrália havia uma taxa sobre o lucro da mineração, criada em 2012, para financiar programas sociais, que foi retirada pelo governo a fim de manter o emprego e a competitividade mundial da indústria minerária australiana (Takano; Flores; Lima, 2016).

No Brasil, ao contrário, a Lei n. 13.575, de 26 de dezembro de 2017 (Brasil, 2017), provocou o aumento na taxa de arrecadação da CFEM, que passou

a incidir sobre a receita bruta da venda dos produtos de mineração, o que pode levar à diminuição da competitividade do segmento mineral brasileiro no contexto mundial. O incentivo fiscal, no contexto brasileiro, não pode objetivar apenas a competitividade internacional, mas também deve ser discricionário para indução da busca de uma maior circularidade no setor, possibilitando o direcionamento de investimentos para uma economia mais circular.

Tendo em vista os entraves na implementação da economia circular, Tingley, Cooper e Cullen (2017) propõem quatro mecanismos para superar as barreiras sistêmicas enfrentadas na adoção das práticas que se aproximem da economia circular: (1) a criação de um banco de dados de fornecedores com disponibilidade de material reutilizável, (2) a demonstração de demanda, (3) orientação técnica e educação para a indústria e (4) liderança do governo. Juntos, esses mecanismos tendem a melhorar o desempenho econômico das organizações, promover a justiça social e reduzir os impactos ambientais, criando cenários favoráveis à aplicabilidade de uma economia mais próxima da circular.

1.3 A Política Nacional dos Resíduos Sólidos e a logística reversa

A Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS) foi instituída pela Lei n. 12.305, de 2 de agosto de 2010, “dispondo sobre seus princípios, objetivos e instrumentos, bem como sobre as diretrizes relativas à gestão integrada e ao gerenciamento de resíduos sólidos, incluídos os perigosos, às responsabilidades dos geradores e do poder público e aos instrumentos econômicos aplicáveis” (Brasil, 2010, p. 1).

A PNRS reúne o conjunto de princípios, objetivos, instrumentos, diretrizes, metas e ações adotados pelo governo federal, visando a gestão integrada e o gerenciamento ambientalmente adequado dos resíduos sólidos, provenientes de diversos setores econômico/industriais. Essa política integra a Política Nacional do Meio Ambiente e articula-se com a Política Nacional de Educação Ambiental, regulada pela Lei n. 9.795, de 27 de abril de 1999

(Brasil, 1999), com a Política Federal de Saneamento Básico, regulada pela Lei n. 11.445, de 5 de janeiro de 2007 (Brasil, 2007) e com a Lei n. 11.107, de 6 de abril de 2005 (Brasil, 2005).

Por essa lei, foi estabelecida a logística reversa, que é definida como um instrumento de desenvolvimento econômico e social, cuja finalidade é viabilizar a coleta e a restituição dos resíduos sólidos ao setor empresarial, para reaproveitamento, em seu ciclo ou em outros ciclos produtivos, ou outra destinação final ambientalmente adequada, por meio de um conjunto de ações, procedimentos e meios para alcançar esse fim (Brasil, 2010).

No Art. 33 da PNRS (Brasil, 2010) estão estipulados os setores que são obrigados a estruturar e implementar sistemas de logística reversa de forma independente do serviço público de limpeza urbana, abrangendo os fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes de: I - agrotóxicos, seus resíduos e embalagens, assim como outros produtos cuja embalagem, após o uso, constitua resíduo perigoso; II - pilhas e baterias; III - pneus; IV - óleos lubrificantes, seus resíduos e embalagens; V - lâmpadas fluorescentes, de vapor de sódio e mercúrio e de luz mista; VI - produtos eletroeletrônicos e seus componentes.

Embora a mineração não esteja entre os setores inicialmente obrigados a implementar sistemas de logística reversa, a lei afirma que os resíduos de mineração precisam ser depositados de maneira adequada, assegurando a devida impermeabilização do solo nas bacias de decantação de resíduos ou rejeitos industriais ou de mineração, devidamente licenciadas pelo órgão ambiental competente. É importante destacar que a lei diferencia resíduos sólidos e rejeitos, sendo:

[...] rejeitos: resíduos sólidos que, depois de esgotadas todas as possibilidades de tratamento e recuperação por processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis, não apresentem outra possibilidade que não a disposição final ambientalmente adequada; resíduos sólidos: material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em so-

cidade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível (Brasil, 2010, p. 1).

Assim, é possível promover a disposição e o tratamento adequados dos resíduos e rejeitos de mineração, de forma que as indústrias do setor possam realizar suas atividades em compatibilidade com os princípios da logística reversa e da economia circular.

2. METODOLOGIA

Foi realizada uma pesquisa sistemática na literatura científica com o intuito de recuperar as publicações que relacionam a logística reversa e a atividade de mineração. Para isso, foi utilizado o Portal de Periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes), que oferece uma pesquisa mais abrangente, pois contempla várias bases de dados.

O Portal de Periódicos Capes (Capes, 2022) é um dos maiores acervos científicos virtuais do País, que reúne e disponibiliza conteúdos produzidos nacionalmente e em parceria com editoras internacionais e instituições de ensino e pesquisa no Brasil. São mais de 49 mil periódicos com texto completo e 455 bases de dados de conteúdos diversos, como referências, patentes, estatísticas, material audiovisual, normas técnicas, teses, dissertações, livros e obras de referência. Segundo Silva (2016), a pesquisa feita em uma única base de dados pode produzir resultados inconsistentes, que devem ser corrigidos com o auxílio de outras bases de dados. A escolha do Portal de Periódicos Capes resolve esse problema, pois indexa várias bases de dados, concentrando os resultados em um só local, evitando a necessidade de pesquisas em outros portais.

A pesquisa foi feita utilizando as palavras-chave *reverse logistics AND mining*. A definição das palavras-chave foi baseada no escopo buscado para esta pesquisa: logística reversa na mineração. O uso de termos em inglês permite uma gama maior de resultados, uma vez que a literatura científica é majoritariamente publicada nesse idioma. Foi utilizado o recurso “busca avançada” e selecionado o campo “assunto”. Também foi escolhido o filtro “data de publicação” a fim de recuperar as publicações recentes (últimos dez anos).

Em relação ao número de artigos recuperados, é importante destacar que, nesta pesquisa, foram utilizados majoritariamente trabalhos científicos, revisados por pares. Essa mesma busca, quando realizada em *sites* como o Google, recupera muitos materiais que nem sempre têm respaldo científico. Para tanto, utilizou-se o Portal de Periódicos Capes, que é uma biblioteca virtual onde estão disponíveis artigos científicos nacionais e internacionais. Não houve necessidade de utilizar qualquer outro tipo de *software* especializado em mineração de dados, pois o Portal de Periódicos Capes é uma iniciativa *sui generis* do governo brasileiro para pesquisa de pós-graduação.

Partindo de mudanças pontuais do cenário atual da logística reversa no setor minerário, é possível identificar e sugerir cenários alternativos, exequíveis economicamente para a atividade industrial, com o intuito de identificar as mudanças que seriam significativas do ponto de vista ambiental. A partir dessa avaliação, são estabelecidas as possíveis oportunidades e os desafios para a aplicação logística reversa, de acordo com as experiências descritas na literatura científica. Com as informações advindas dessa pesquisa, é possível simular cenários realísticos sobre o impacto da mudança nos insumos, descartes e processos em direção à economia circular.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Em um primeiro momento, a quantidade de trabalhos recuperados, utilizando as palavras-chave *reverse logistics* AND *mining* (logística reversa e mineração), foi de 70 artigos científicos revisados por pares. No entanto, muitos deles não faziam parte do escopo do estudo por não estarem relacionados à atividade minerária propriamente dita, mas aos estudos relativos à análise de algoritmos (Liu; Cai; Guo, 2015), *Big Data* (Qian *et al.*, 2021) e mineração de dados (LV *et al.*, 2018), por exemplo.

Assim, uma nova busca foi realizada, acrescentando ao campo de busca a combinação NOT *data mining*. Dessa forma, foram recuperados 29 artigos revisados por pares que tratam, especificamente, da relação entre a mineração e a logística reversa. Essa quantidade pode ser considerada pequena, quando comparada, por exemplo, à pesquisa de trabalhos utilizando como palavras-chave os setores que são obrigados a implementar sistemas de logística reversa (Tabela 1).

Tabela 1

Quantidade de trabalhos recuperados, por setor

Setor	Palavras-chave	Quantidade
Mineração	"reverse logistics" AND mining	29
Agrotóxicos e resíduos perigosos	"reverse logistics" AND pesticides "reverse logistics" AND "hazardous waste"	165 500
Pilhas e baterias	"reverse logistics" AND batteries	683
Pneus	"reverse logistics" AND tire	414
Óleos lubrificantes	"reverse logistics" AND "lubricating oils" "reverse logistics" AND lubricant	52 84
Lâmpadas	"reverse logistics" AND lamps	113
Produtos eletrônicos	"reverse logistics" AND "electronic products" "reverse logistics" AND "electronic components"	539 115

Fonte: Elaborada pela autora.

Dos artigos encontrados, apenas um está em português. Todos os demais foram publicados em inglês. Essa informação indica que a maioria dos

trabalhos científicos é publicada nesse idioma, destacando a importância de publicar em inglês, ampliando a possibilidade de que o trabalho seja lido globalmente. A diferença na quantidade de trabalhos encontrados para o setor de mineração pode ser explicada pelo fato de não haver obrigação para implementação da logística reversa nesse ramo, o que diminui a quantidade de trabalhos científicos desenvolvidos envolvendo a logística reversa e a atividade minerária. Dessa forma, encontra-se uma oportunidade para a ampliação de pesquisas científicas sobre esse assunto.

Outro dado importante, constatado nos resultados da Tabela 1, é a expressiva quantidade de trabalhos desenvolvidos para os setores de agrotóxicos, pilhas e baterias, pneus e produtos eletrônicos. Segundo Mohammed *et al.* (2021), a eficiência no processo de coleta de resíduos é um dos maiores impulsionadores da logística reversa, o que pode ser uma realidade para esses setores, em que a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos já é uma realidade mais efetiva.

Sobre a responsabilidade compartilhada, a lei define, no Art. 30, a instituição da responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos, que deve ser implementada de forma individualizada e encadeada, abrangendo os fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes, os consumidores e os titulares dos serviços públicos de limpeza urbana e de manejo de resíduos sólidos. Pereira e Oliveira (2019) dizem que incentivos fiscais e tributários estimulam comportamentos ambientalmente adequados no contexto da responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos.

Os artigos encontrados abordam os temas destacados na Tabela 2. É importante observar que um mesmo artigo pode abordar mais de um tema, portanto um artigo pode estar em mais de uma das categorias temáticas descritas na Tabela 2.

Tabela 2

Quantidade de artigos por categoria ou área temática

Principal assunto	Quantidade
Ciência e tecnologia	24
Indústria de mineração	16
Ciências ambientais e ecologia	14
Cadeia de suprimentos	11
Sustentabilidade e desenvolvimento sustentável	7

Fonte: Portal Capes (2022).

Os estudos mostram que existem possibilidades de aplicação da logística reversa no setor minerário, considerando as particularidades de cada tipo de atividade e os produtos que podem ser reaproveitados. Uma das formas de investimento em ciência e tecnologia, para a promoção da circularidade no sistema, consiste em incentivar mudanças na abordagem atual em relação à forma de inovação multidimensional (por exemplo, produtos, processos e estruturas), que devem ser consideradas de várias perspectivas, incluindo aspectos tecnológicos, geológicos e econômicos. As condições do quadro econômico, em particular, determinam o corte entre “produto valioso” e “resíduos” (Geissler *et al.*, 2018).

A indústria da mineração fornece agregados para a construção civil, como brita e areia. Esses agregados naturais (brita e areia) podem ser substituídos por agregados reciclados, como os resíduos da construção civil (RCD). Existem diversas opções, nesse contexto, como os resíduos de beneficiamento de rochas ornamentais (Leite *et al.*, 2018), resíduos de postes de concreto (Ferreira *et al.*, 2016), assim como os resíduos produzidos nas próprias obras (Evangelista; Costa; Zanta, 2010), que podem ser utilizados para esse fim. Os RCDs são capazes de gerar agregados de alta qualidade, comprovados por ensaios de resistência à compressão, à tração e à flexão (Kabir; Al-Shayeb; Khan, 2016).

O uso de RCDs, no Brasil, é regulamentado pela Resolução 307, de 5 de julho de 2002, do Conselho Nacional do Meio Ambiente (Conama), que estabelece as diretrizes, os critérios e os procedimentos para a gestão desses resíduos, com o objetivo de promover a redução, a reutilização ou a reciclagem dos mesmos. Os resíduos são classificados de acordo com o tipo, e a sua deposição não pode ser feita em aterros de resíduos domiciliares, em áreas de “bota fora”, em encostas, corpos d’água, lotes vagos e em áreas protegidas por lei. No Brasil, não é permitido utilizar agregados reciclados para concretos estruturais (Brasil, 2002).

No entanto, é preciso avaliar a viabilidade econômica, tecnológica, de transporte, entre outros fatores, para que o uso dessa alternativa não se torne mais impactante para o meio ambiente ou inviável economicamente (Coelho; Brito, 2013). Nesse contexto, a triagem é um dos processos mais importantes para o uso eficiente de RCDs. Santana *et al.* (2019) acreditam que a classificação adequada pode promover a reutilização integral e racional dessas matérias-primas secundárias em diferentes produtos à base de cimento, no setor da construção. Penteado e Rosado (2016) salientam que a triagem eficiente nos canteiros de obras evita o transporte para outras instalações de reciclagem, garantindo que os processos de tomada de decisão sejam baseados em aspectos técnicos e ambientais, e não, apenas, econômicos. A questão logística pode ser um entrave para o uso de RCDs e precisa ser cuidadosamente considerada quanto o objetivo é a redução de impactos ambientais.

Um estudo desenvolvido na área de Nova York demonstrou que a utilização de RCD como agregado de concreto não afeta significativamente o impacto ambiental da produção de concreto naquela região. No entanto, o uso do concreto reciclado evita a deposição em aterros, reduzindo o impacto desse acúmulo. A demanda por transporte e cimento (os maiores estressores ambientais da produção de concreto) deve ser avaliada conjuntamente para determinar em qual tipo de projeto o uso do RCD tem os maiores benefícios ambientais (Yazdanbakhsh *et al.*, 2018), para que a logística

reversa não se torne um entrave no processo, em vez de uma solução para problemas socioambientais.

Apesar de a utilização do RCD mostrar-se uma alternativa para solucionar problemas ambientais e econômicos da indústria da construção civil, para se fazer melhor uso dessa tecnologia, é importante que as características de agregados oriundos de RCD sejam constantemente estudadas, uma vez que ainda não há uma norma específica que padronize a utilização de agregados reciclados na produção de concreto estrutural (Domenico *et al.*, 2018). Essa mesma perspectiva pode (e deve) ser considerada para qualquer tipo de produto, proveniente de qualquer recurso mineral.

Outro estudo demonstrou os resultados da implementação da logística reversa a partir da trituração de pneus em minas para abastecer uma usina de geração de energia. Essa pode ser uma solução lucrativa que pode ajudar as minas a cumprir os regulamentos legais e transformar esse resíduo em um bem de valor econômico positivo. As implicações ambientais e sociais são a mitigação de pneus inservíveis, o aumento da demanda de trabalho desencadeada pelas usinas e a melhoria da saúde pública nas proximidades dos locais de mineração (Cervantes; Mier, 2019).

Bouzon, Govindan e Rodriguez (2015) afirmam que, para o setor mine-
rário, a falta de leis específicas e a falta de legislação motivacional ainda são impedimentos significativos para a implementação da logística reversa no Brasil. Fatores comportamentais em cadeias de suprimentos também são um desafio crítico, uma vez que ainda não é um assunto acadêmico bem explorado, quando o foco está na indústria de mineração de economias emergentes; a falta de estudos nessa área pode ser um fator que impede que a indústria de mineração se torne mais verde e sustentável (Muduli *et al.*, 2020). Portanto, incentivos governamentais, tanto fiscais como fomento à pesquisa, podem ser o caminho para a implantação da logística reversa em direção à economia circular.

É fato que há uma pressão crescente sobre as empresas de mineração para melhorar seu desempenho ambiental. Nesse sentido, a gestão da

cadeia de suprimentos é uma estratégia que não apenas melhora o desempenho ambiental de organizações individuais, mas também de toda a cadeia de valor. No entanto, uma exceção é observada no caso das indústrias de mineração, que pode ser atribuída à má compreensão dos fatores envolvidos. Os resultados do estudo de Govindan *et al.* (2016) demonstram que o “compromisso da alta administração” e a “competitividade” são os dois fatores mais importantes quando se trata das dificuldades para implementar melhorias no desempenho da cadeia de valor da mineração.

Assim, Pooe e Mhelembe (2014) sugerem que os desafios para incentivar a circularidade no setor minerário incluem a operacionalização de questões ambientais, a falta de colaboração e compartilhamento de conhecimento, a aplicação adequada de sistemas de monitoramento e controle, a falta de política clara e direção legislativa, o custo de implementação de práticas de gestão da cadeia de suprimentos e a necessidade de uma liderança forte e de gerenciamento de mudança.

Dessa forma, para que a indústria da mineração possa caminhar em direção à economia circular, implementando sistemas de logística reversa nos diferentes tipos de atividade minerária, é preciso estabelecer diretrizes que possam incentivar essas práticas. Os benefícios da melhoria na circularidade do sistema e na gestão da cadeia de suprimentos são percebidos dos pontos de vista ambiental, econômico e social.

3.1 Diretrizes mínimas para implementação da logística reversa na atividade de mineração

De acordo com as experiências descritas na literatura científica, é possível estabelecer alguns passos em direção à implementação da logística reversa no setor minerário, com base nos princípios da economia circular (Figura 1).

Figura 1

Diretrizes mínimas para implementação da logística reversa na atividade de mineração



Fonte: Elaborada pela autora.

O primeiro passo é entender e mapear as principais etapas que envolvem o ciclo de vida dos produtos da mineração: extração da matéria-prima mineral; transporte para a produção; produção; transporte para a venda; uso/consumo; disposição final. Cada etapa possui diferentes atividades e impactos próprios, incluindo as atividades de fornecedores, clientes e outros envolvidos na cadeia produtiva do setor.

O segundo passo consiste em analisar fatores que podem influenciar o direcionamento das ações rumo a uma gestão logística mais sustentável. Por exemplo, conhecer as atividades de cada etapa identificadas no primeiro

passo; conhecer as empresas envolvidas, desde aquelas que fornecem máquinas e equipamentos até as indústrias que receberão o insumo mineral extraído para a confecção de produtos; dar preferência para fornecedores locais, evitando os impactos (por exemplo, emissões) com deslocamento para o fornecimento dos insumos; identificar os recursos utilizados (e suas quantidades) para o funcionamento do estabelecimento (água, energia, matérias-primas); conhecer os tipos de resíduos e rejeitos que são gerados na indústrias, bem como as formas de aproveitamento; verificar os impactos diretos e indiretos na sociedade (colaboradores, clientes e comunidade), incluindo os impactos sociais positivos (geração de empregos, por exemplo).

O terceiro passo está relacionado ao produto fora da empresa. A logística direta, nessa etapa, é fundamental para garantir a redução de impactos ambientais e ganhos econômicos. Quanto mais bem elaborado o sistema logístico, maior a possibilidade de que o caminho inverso (logística reversa) funcione adequadamente. É preciso, também, entender o uso dos produtos confeccionados a partir de recursos minerais pelos consumidores diretos e indiretos a fim de identificar melhorias no final da vida útil e como os resíduos podem ser reaproveitados nas cadeias de valor.

O quarto passo está relacionado à gestão dos resíduos. Uma gestão eficiente de resíduos envolve ações de separação de produtos potencialmente reutilizáveis para reaproveitamento na confecção de outros produtos, por exemplo, reaproveitar resíduos de materiais de construção para utilização no lugar de areia e brita (recursos minerais extraídos diretamente do meio ambiente). Um avanço maior, nessa etapa, é a parceria com empresas, academia e governo para que haja incentivo fiscal e fomento à pesquisa, para o uso eficiente de produtos reciclados de fontes minerais.

O quinto passo consiste na implementação da logística reversa. A partir do entendimento dos impactos (ambientais, econômicos e sociais) gerados ao longo do ciclo de vida da produção e comercialização de artigos minerais, torna-se possível identificar oportunidades para investimentos em melhorias na circularidade dos produtos de origem mineral, de forma que sejam

abarcadas as questões ambientais, juntamente com o aprimoramento dos aspectos econômicos e sociais. O resultado é a diminuição da exploração das jazidas minerais, bem como dos resíduos no meio ambiente.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dos estudos encontrados na literatura científica, foi percebido que o desafio para a implementação da logística reversa na mineração é grande, porém, não impossível. Embora o engajamento no sentido de priorizar as escolhas, considerando os fatores ambientais, seja algo distante da realidade, foi possível vislumbrar iniciativas que podem direcionar as indústrias da mineração rumo à economia circular. O tema ainda é muito desafiador e o cenário ideal é aquele em que haja a disseminação das ideias da economia circular no setor minerário para que a implementação de sistemas de logística reversa possa se tornar uma realidade na mineração.

Embora existam resíduos potencialmente reaproveitáveis, é preciso conhecer sua destinação para que seja feita de forma adequada e para que os materiais reaproveitáveis sejam destinados à reciclagem. A atividade de mineração gera muitos rejeitos, que não podem ser reaproveitados, e sua deposição adequada é imprescindível para que não haja contaminação ambiental.

Essas empresas possuem um importante papel social, pois geram empregos e renda, além de incremento aos cofres públicos por meio do pagamento de impostos. No entanto, ainda há um longo caminho a ser percorrido no sentido da produção mais sustentável e da melhoria na circularidade do sistema, de forma que toda a cadeia de valor possa incorporar o conceito de economia circular, implementando ações que promovam a logística reversa.

Assim, as indústrias da mineração têm a oportunidade de disseminar esse conhecimento entre os atores da cadeia, a fim de mobilizar esse setor na busca de aprimorar as práticas de sustentabilidade existentes e adotar outras ações que venham a contribuir com o meio ambiente e com a socie-

dade, ao mesmo tempo que promovem benefícios econômicos para os empreendimentos. As diretrizes propostas podem ser estendidas a outros setores econômicos/industriais, em diversas partes do Brasil e do mundo.

Reverse logistics: possibilities and challenges for the mining sector

ABSTRACT

The growing demand for industrialized products leads to an increase in the extraction of natural resources, especially minerals. Mining activity generates environmental impacts, whose effects can last for many years. Discarded waste and tailings are important sources of mining impact. Economic, social, and environmental factors point to the lack of sustainability of this linear economic model. Among the solutions are the circular economy model and reverse logistics. This article aims to discuss, based on the experiences described in the scientific literature, how reverse logistics can be implemented in mining to be compatible with the circular economy principles. The CAPES Periodicals Portal was used to search for papers related to the subject. Through the analysis of the articles found, it was possible to identify the difficulties and possibilities and establish the minimum guidelines for the implementation of reverse logistics in the mining sector.

Keywords: Mining; Circular economy; Life cycle.

Referências

- BELLANTUONO, N.; CARBONARA, N.; PONTRANDOLFO, P. The organization of eco-industrial parks and their sustainable practices. *Journal of Cleaner Production*, v. 161, p. 362-375, 2017.
- BOUZON, M.; GOVINDAN, K.; ROGRIGUEZ, C. M. T. Reducing the extraction of minerals: Reverse logistics in the machinery manufacturing industry sector in Brazil using ISM approach. *Resources Policy*, v. 46, p. 27-36, 2015.
- BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (Conama). *Resolução 307*, de 5 de julho de 2002. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/res/reso2/res30702.html>. Acesso em: 1º abr. 2021.

BRASIL. *Lei n. 9.795, de 27 de abril de 1999*. Dispõe sobre a educação ambiental, institui a Política Nacional de Educação Ambiental e dá outras providências. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9795.htm. Acesso em: 21 abr. 2022.

BRASIL. *Lei n. 11.107, de 6 de abril de 2005*. Dispõe sobre normas gerais de contratação de consórcios públicos e dá outras providências. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2005/lei/l11107.htm. Acesso em: 22 abr. 2022.

BRASIL. *Lei n. 11.445, de 5 de janeiro de 2007*. Estabelece as diretrizes nacionais para o saneamento básico; cria o Comitê Interministerial de Saneamento Básico; altera as Leis nos 6.766, de 19 de dezembro de 1979, 8.666, de 21 de junho de 1993, e 8.987, de 13 de fevereiro de 1995; e revoga a Lei nº 6.528, de 11 de maio de 1978. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2007/lei/l11445.htm. Acesso em: 19 abr. 2022.

BRASIL. *Lei n. 12.305, de 2 de agosto de 2010*. Política Nacional de Resíduos Sólidos. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm. Acesso em: 22 abr. 2022.

BRASIL. *Lei n. 13.575, de 26 de dezembro de 2017*. Cria a Agência Nacional de Mineração (ANM); extingue o Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM); altera as Leis n. 11.046, de 27 de dezembro de 2004, e 10.826, de 22 de dezembro de 2003; e revoga a Lei n. 8.876, de 2 de maio de 1994, e dispositivos do Decreto-Lei n. 227, de 28 de fevereiro de 1967 (Código de Mineração). Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2017/lei/L13575.htm. Acesso em: 20 abr. 2022

CE100 BRASIL. *Uma economia circular no Brasil: uma abordagem exploratória inicial*. Rio de Janeiro, 2017. Disponível em: https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/languages/Uma-Economia-Circular-no-Brasil_Uma-Exploracao-Inicial.pdf. Acesso em: 29 jul. 2018.

CERVANTES, J. O.; MIER, R. A. Reverse logistics network design for large off-the-road scrap tires from mining sites with a single shredding resource scheduling application. *Waste Management*, v. 100, p. 219-229, 2019.

- COELHO, A.; BRITO, J. Economic viability analysis of a construction and demolition waste recycling plant in Portugal – part I: location, materials, technology and economic analysis. *Journal of Cleaner Production*, v. 39, p. 338-352, 2013.
- Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior. *Portal de Periódicos*. 2022. Disponível em: <https://www-periodicos-capes-gov-br.ez1.periodicos.capes.gov.br/index.php/sobre/quem-somos.html>. Acesso em: 19 abr. 2022.
- COTA, E.; TORRES, M. P.; FERREIRA, J. A. T.; FIDÊNCIO, A. X.; RODRIGUES, G. B.; ROCHA, F. A. S.; AZPÚRUA, H.; FREITAS, G. M.; MIOLA, W. Robótica na mineração. *Anais dos Seminários de Redução, Minério de Ferro e Aglomeração*, v. 47, n. 2, p. 359-370, 2017.
- DOMENICO, P. D.; LIMA, T. T.; CASTRO, R. M.; CASTRO, M. N. Influência do agregado miúdo reciclado na resistência à compressão e porosidade do concreto. *Revista Internacional de Ciências*, v. 8, n. 1, p. 129-147, 2018.
- EVANGELISTA, P. P. A.; COSTA, D. B.; ZANTA, V. M. Alternativa sustentável para destinação de resíduos de construção classe A: sistemática para reciclagem em canteiros de obras. *Ambiente Construído*, v. 10, n. 3, p. 23-40, 2010.
- FERREIRA V. J.; VILAPLANA, A. S. G.; ARMINGOL, T. G.; USON, A. A.; GONZALEZ, C. L.; SABIRON, A. M. L.; FERREIRA, G. Evaluation of the steel slag incorporation as coarse aggregate for road construction: technical requirements and environmental impact assessment. *Journal of Cleaner Production*, v. 130, p. 175-186, 2016.
- GEISSLER, B.; HERMANN, L.; MEW, M. C.; STEINER, G. Striving toward a circular economy for phosphorus: the role of phosphate rock mining. *Minerals*, v. 8, p. 1-22, 2018.
- GEJER, L.; TENNENBAUM, C. Os três princípios da inovação circular do berço ao berço. *Ideia Circular*, 2017. Disponível em: <http://www.ideiacircular.com/economia-circular>. Acesso em: 18 abr. 2022.
- GOVINDAN, K.; MUDULI, K.; DEVIKA, K.; BARVE, A. Investigation of the influential strength of factors on adoption of green supply chain management practices: An Indian mining scenario. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 107, p. 185-194, 2016.

- JABBOUR, A. B. L.S.; JABBOUR, C. J. C.; GODINHO FILHO, M.; ROUBAUD, D. Industry 4.0 and the circular economy: a proposed research agenda and original roadmap for sustainable operation. *Annals of Operation Research*, v. 270, p. 273-286, 2018.
- KABIR, S.; AL-SHAYEB, A.; KHAN, I. M. Recycled construction debris as concrete aggregate for sustainable construction materials. *Procedia Engineering*, v. 145, p. 1518-1525, 2016.
- KIRCHHERR, J.; REIKE, D.; HEKKERT, M. Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 127, p. 221-232, 2017.
- LEITE, F. R.; ANTUNES, M. L. P.; SILVA, D. A. L.; OLIVEIRA, P. S. Avaliação do ciclo de vida da produção de argamassas com resíduos de beneficiamento de rochas ornamentais (RBRO). In: Congresso Brasileiro sobre Gestão do Ciclo de Vida, 2018, Brasília. *Anais [...]*. Brasília: IBICT, 2018. p. 567-571.
- LIU, Z.; ADAMS, M.; WALKER, T. R. Are exports of recyclables from developed to developing countries waste pollution transfer or part of the global circular economy? *Resources, Conservation & Recycling*, v. 136, p. 22-23, 2018.
- LIU, D.; CAI, S.; GUO X. Incremental sequential pattern mining algorithms of Web site access in grid structure database. *Neural Computing and Applications*, v. 28, p. 575-583, 2015.
- LV, S.; KIM, H.; ZHENG, B.; JIN, H. A review of data mining with Big Data towards its applications in the electronics industry. *Applied Sciences*, v. 8, p. 1-34, 2018.
- MOHAMMED, A.; ZIOUT, A.; SALAH, B.; ALATEFI, M.; ELGAWAD, A. E. E. A.; BAWELAN, A.; SYARIF, U. An insight into reverse logistics with a focus on collection systems. *Sustainability*, v. 13, p. 1-22, 2021.
- MONTEIRO, N. B. R.; MOITA NETO, J. M.; DA SILVA, E. A. Bibliometric study of the crushed stone mining sector. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review* [on-line], 2018.
- MONTEIRO, N. B. R.; SILVA, E. A.; MOITA NETO, J. M. Sustainable development goals in mining. *Journal of Cleaner Production*, v. 228, p. 509-520, 2019.

- MUDULI, K. K.; LUTHRA, S.; MANGLA, S. K.; JABBOUR, C. J. C.; AICH, S.; GUIMARÃES, J. C. F. Environmental management and the “soft side” of organisations: Discovering the most relevant behavioural factors in green supply chains. *Business Strategy and the Environment*, v. 29, p. 1647-1665, 2020.
- NASIR, M. H. A.; GENOVESE, A.; ACQUAYE, A. A.; KOH, S.C.L.; YAMOA, F. Comparing linear and circular supply chains: A case study from the construction industry. *International Journal of Production Economics*, v. 183, p. 443-457, 2017.
- PENTEADO, C. S. G.; ROSADO, L. P. Comparison of scenarios for the integrated management of construction and demolition waste by life cycle assessment: A case study in Brazil. *Waste Management & Research*, v. 34, n. 10, p. 1026-1035, 2016.
- PEREIRA, M. M. F.; OLIVEIRA, L. T. Responsabilidade compartilhada na Política Nacional de Resíduos Sólidos: aplicabilidade da norma tributária ambiental indutora. *Direito e Desenvolvimento*, v. 10, n. 2, p. 322-335, 2019.
- POOE, D. R. I.; MHELEMBE, K. Exploring the challenges associated with the greening of supply chains in the South African manganese and phosphate mining industry. *Journal of Transport and Supply Chain Management*, v. 8, p. 1-9, 2014.
- QIAN, Z.; YANG, X.; XU, Z.; CAI, W. Research on key construction technology of building engineering under the background of Big Data. *Journal of Physics: Conference Series*, v. 1802, p. 1-9, 2021.
- RIGAMONTI, L.; FALBO, A.; ZAMPORI, L.; SALA, S. Supporting a transition towards sustainable circular economy: sensitivity analysis for the interpretation of LCA for the recovery of electric and electronic waste. *International Journal of Life Cycle Assessment*, v. 22, p. 1278-1287, 2017.
- SANTANA, R. C.; TOLEDO FILHO, R. D.; AMARIO, M.; PEPE, M.; POLISSENI, G. C.; ANDRADE, G. P. Generalized quality control parameter for heterogeneous recycled concrete aggregates: A pilot scale case study. *Journal of Cleaner Production*, v. 208, p. 589-601, 2019.
- SANTIAGO, L. *Economia circular*. Ellen Macarthur Foundation, 2016. Disponível em: http://www.rio.rj.gov.br/dlstatic/10112/6458684/4173222/ConceitosdeEconomiaCircular_LuisaSantiago.pdf. Acesso em: 15 jul. 2018.

- SANTOLIN, R. B.; CATEN, C. S. Modelos de distritos industriais sob a ótica da sustentabilidade: uma revisão bibliográfica. *Iberoamerican Journal of Industrial Engineering*, v. 7, n. 14, p. 129-151, 2015.
- SILVA, E. A. Produção brasileira “visível” em avaliação do ciclo de vida. In: Congresso Brasileiro em Gestão do Ciclo de Vida, 5., 2016, Fortaleza. *Anais [...]*. Fortaleza: ABCV, 2016. p. 335-341.
- TAKANO, C. C.; FLORES, J. C. C.; LIMA, H. M. An analysis of the rate for controlling, monitoring and supervision of exploration and mining activities of mineral resources (TFRM). *Revista Escola de Minas*, v. 69, n. 1, p. 105-110, 2016.
- TINGLEY, D. D.; COOPER, S.; CULLEN, J. Understanding and overcoming the barriers to structural steel reuse, a UK perspective. *Journal of Cleaner Production*, v. 148, p. 642-652, 2017.
- YAZDANBAKHSI, A.; BANK, L. C.; BAEZ, T.; WERNICK, I. Comparative LCA of concrete with natural and recycled coarse aggregate in the New York City area. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, v. 23, p. 1163-1173, 2018.