



Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas
Departamento de Engenharia Civil
Mestrado Profissional em Construção Metálica



Sistema logístico reverso aplicado a planta de processamento de rejeitos de barragem de minério de ferro

Autora: Samantha Rodrigues de Araújo

Orientador: Prof. Dr. Ricardo André Fiorotti Peixoto

Co-orientadora: Prof^a. Dra. Lásara Fabrícia Rodrigues

Ouro Preto, Maio de 2018



Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas
Departamento de Engenharia Civil
Mestrado Profissional em Construção Metálica



Sistema logístico reverso aplicado a planta de processamento de rejeitos de barragem de minério de ferro

Autora: Samantha Rodrigues de Araújo

Orientador: Prof. Dr. Ricardo André Fiorotti Peixoto

Co-orientadora: Prof^a. Dra. Lásara Fabrícia Rodrigues

Dissertação apresentada ao Programa de Mestrado Profissional em Construção Metálica da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, área de concentração: Gestão, Produção e Projetos.

Ouro Preto, Maio de 2018

A663s Araújo, Samantha Rodrigues De .

Sistema logístico reverso aplicado a planta de processamento de rejeitos de barragem de Minério de Ferro . [manuscrito] / Samantha Rodrigues De Araújo. - 2019.

42 f.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo André Fiorotti Peixoto.

Coorientadora: Profa. Dra. Lásara Fabrícia Rodrigues.

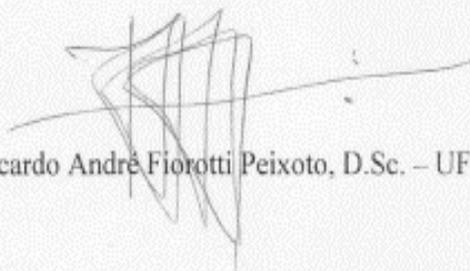
Dissertação (Mestrado Profissional). Universidade Federal de Ouro Preto.
Departamento de Engenharia Civil. Programa de Engenharia das Construções.

1. Beneficiamento de minério - Minério de Ferro. 3. Estudos de viabilidade . 4. Reaproveitamento (Sobras, refugos, etc.) . I. Araújo, Samantha Rodrigues De . II. Peixoto, Ricardo André Fiorotti . III. Rodrigues, Lásara Fabrícia . IV. Universidade Federal de Ouro Preto. V. Título.

**SISTEMA LOGÍSTICO REVERSO APLICADO A PLANTA DE
PROCESSAMENTO DE REJEITOS DE BARRAGEM DE MINÉRIO
DE FERRO**

AUTORA: SAMANTHA RODRIGUES DE ARAÚJO

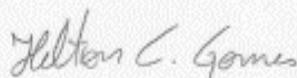
Esta dissertação foi apresentada em sessão pública e aprovada em dez de maio de 2018, pela Banca Examinadora composta pelos seguintes membros:



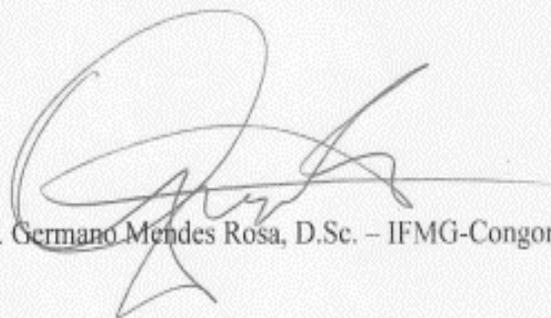
Prof. Ricardo André Fiorotti Peixoto, D.Sc. – UFOP (Presidente)



Profa. Lásara Fabricia Rodrigues, D.Sc. – UFOP



Prof. Helton Cristiano Gomes, D.Sc. – UFOP



Prof. Germano Mendes Rosa, D.Sc. – IFMG-Congonhas

RESUMO

Nas atividades inerentes a mineração, ocorre uma elevada geração de materiais de baixo ou nenhum valor econômico, cuja destinação impacta de maneira direta na viabilidade do seu reaproveitamento. Os principais materiais gerados são os estéreis e os rejeitos, sendo os estéreis provenientes das atividades de extração do minério e os rejeitos gerados pelas usinas de beneficiamento. Geralmente, os estéreis são dispostos em pilhas e os rejeitos são armazenados em barragens (na forma de lama). Estudos recentes apontam que a extração e o beneficiamento de minérios com baixa qualidade aumentará nos próximos anos, elevando, portanto, a geração de resíduos. Somente em 2017, aproximadamente 229 milhões de toneladas de rejeitos de minério de ferro foram produzidos no Brasil. Portanto, sem a devida destinação final, esses resíduos causam impactos ambientais, econômicos e sociais, fato que tem motivado o desenvolvimento de estudos com o intuito de encontrar possíveis alternativas de reaproveitamento para estes materiais. Diante disso, a logística reversa se apresenta como uma importante ferramenta, já que auxilia no dimensionamento adequado dos recursos logísticos necessários por transportar o rejeito do local onde se encontra armazenado até o local em que será reaproveitado. Dessa forma, este trabalho tem como objetivo, dimensionar e comprovar a viabilidade econômica de um sistema logístico reverso responsável por transportar o rejeito armazenado em uma planta de processamento de rejeitos de barragem de minério de ferro até o local da construção de uma pavimentação rodoviária, onde será utilizado como matéria prima para infraestrutura. Como resultado, o sistema logístico foi dimensionado considerando as restrições de capacidade dos recursos e limitações operacionais e sua viabilidade econômica de implementação foi comprovada.

Palavras Chaves: Rejeito de Minério de Ferro; Simulação; Viabilidade Econômica, Aproveitamento.

ABSTRACT

In mining activities, there is a high generation of materials of low or no economic value, whose destination impacts directly on the viability of its reuse. The main materials generated are the sterile and the tailings, being the sterile coming from the activities of extraction of the ore, and the tailings coming by the beneficiation plants. Usually, the sterile is disposed in piles and the tailings are deposited in dams (in the form of mud). Recent studies indicate that the extraction and processing of low quality ores will increase in coming years, increasing the generation of waste. Only in 2017, approximately 229 million tons of iron ore tailings were produced in Brazil. However, without the proper destination, these wastes cause environmental, economic and social impacts, a fact that has motivated the development of studies with the objective of find alternatives to reuse these materials. In this scenario, reverse logistics presents itself as an important tool, since it assists in the adequate dimensioning of the necessary logistic resources for transporting the waste from the place where it is stored to the place where it will be reused. Therefore, the objective of this work is to evaluate and prove the economic feasibility of a reverse logistics system, responsible for transporting tailings stored in a dam to the place where the paving will be built, where it will be used as the feedstock. As a result, the logistic system was scaled, considering resource constraints and operational limitations and its economic feasibility of implementation was proven.

Keywords: Iron ore tailings; Simulation; Economic Feasibility.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Etapas do tratamento do minério	13
Figura 2 - Fases de um estudo de simulação	21
Figura 3 - Sistema logístico	22
Figura 4 - Modelo conceitual.....	25

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Dados de entrada	26
Quadro 2 - Dados de Controle	27
Quadro 3 - Expressões probabilísticas utilizadas como parâmetros de entrada do modelo de simulação	28
Quadro 4 - Custos do sistema logístico referentes aos 2 cenários de simulação	30
Quadro 5 - Resultado da simulação	32

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Distâncias e caminhões (pilhas/pavimentação)	33
Tabela 2 - Custo médio de transporte / tonelada de rejeito.....	33

SUMÁRIO

1	Introdução	10
2	Referencial Bibliográfico	13
2.1	Mineração	13
2.2	Rejeito da mineração do minério de ferro e sua utilização na cadeia produtiva da construção civil	15
2.3	Simulação Computacional	18
2.4	Análise de Viabilidade Econômica	20
3	Metodologia	21
3.1	Modelo de Simulação	21
3.2	Formulação do Problema	22
3.3	Definição dos Objetivos.....	23
3.3.1	Na Barragem.....	23
3.3.2	Na Planta Industrial	23
3.3.3	No Local da Pavimentação	24
3.4	Modelo Conceitual.....	24
3.5	Coleta de Dados	25
3.6	Tradução do Modelo	28
3.7	Verificação do Modelo	28
3.8	Validação do Modelo.....	29
3.9	Proposição de Cenários.....	29
3.10	Testes e Análises; Mudanças e Documentação	29
3.11	Viabilidade Econômica.....	29
4	Resultados e Discussões	32
5	Conclusão	36
6	Referências	37

1 Introdução

Conforme Bacci et al. (2006), a prática relacionada à exploração mineral pode gerar impactos ambientais irreversíveis. Da perspectiva ambiental, o uso exploratório dos recursos minerais se caracteriza como uma atividade não sustentável, já que, para a sua prática é necessária a retirada dos recursos naturais do meio ambiente, contribuindo, portanto, para o esgotamento do minério, visto que a maioria desses materiais não é renovável (Cabral, 2012).

No entanto, Yellishetty et al. (2008) afirmam ser possível que as atividades inerentes a mineração tornem-se sustentáveis, porém é necessário atestar sua viabilidade econômica, ambiental e social. Todavia, estudos referentes a sustentabilidade geralmente são complexos, destituídos de diretrizes práticas e na maioria dos casos, se concentram principalmente no componente energético (Ismail, Hashmi, 2008).

Especificamente no setor da mineração, conforme Instituto Brasileiro de Mineração (Ibram, 2016), houve um considerável aumento das atividades de extração do minério de ferro no país, possibilitando o beneficiamento de minérios com qualidade baixa. Esse fato fez com que a geração de rejeitos aumentasse, tornando a disposição final e o gerenciamento dos rejeitos, assuntos cada vez mais importantes.

Conforme Kinnunen et al. (2017), os volumes de rejeitos crescem na mesma proporção da produção da mineração, fato que leva a geração de graves problemas de passivos ambientais. Um estudo realizado por Jones e Boger (2012) revelou que 14 bilhões de toneladas de rejeitos foram produzidos pelo setor de mineração somente no ano de 2010. Vale destacar que o grande volume de rejeitos resulta em um problema espacial (devido a grande área destinada ao armazenamento), e em um problema temporal, já que se faz necessários longos períodos para que o rejeito seja gerenciado e reabilitado (Adiansyah et al., 2015). Os autores ressaltam que a gestão desses rejeitos é uma questão crítica na mineração, devido aos impactos irreversíveis causados ao meio ambiente. Dessa forma, a composição físico-química desses elementos se apresenta como o principal foco de pesquisas e estudos, para que perspectivas possíveis possam ser alcançadas, viabilizando alternativas para o aproveitamento dos rejeitos (Yellishetty et al., 2008).

Vale destacar que a forma de descarte e disposição dos rejeitos de minério de ferro mais utilizada pelas mineradoras brasileiras é a feita em superfície, em que os rejeitos são transportados em forma de lama e dispostos em barragens (Ibram, 2016; Ipea, 2012). Além disso, a lama possui

teor de água elevado, sendo a causa principal de falhas nas barragens (Burritt, Christ, 2018; Morgenstern et al., 2016; Fourie, 2012; Franks et al., 2010).

Atualmente no país, as alternativas frequentemente adotadas para a utilização dos rejeitos provenientes da mineração são prioritariamente o armazenamento de lamas em rejeitos de barragens e o empilhamento e preenchimento de cavas exauridas de minas (Wolff, 2009; Wolff, Costa, Dutra, 2011).

Por sua vez, a configuração atual do cenário econômico do país, tem proporcionado o aumento da demanda por agregados naturais na construção civil. Segundo Ibram (2016), 673 milhões de toneladas de agregados naturais foram produzidas em 2014, cujo consumo se deu principalmente na região sudeste. No entanto, simultaneamente a esse fato, aumentam as restrições ambientais a sua exploração e a distância entre o local de aquisição do agregado ao local de sua utilização ampliando, portanto, o custo final da obra.

Diante desse tema, pesquisas vêm sendo desenvolvidas a fim de analisar a viabilidade da substituição da matéria prima por rejeitos da mineração no setor de construção civil, como as de Luo et al. (2016), Peixoto et al. (2016), Shettima et al. (2016), Sabat et al. (2015), Fontes et al. (2016), Bastos et al. (2016), Silva et al. (2014), Vergara (2012) e Campanha (2011). Esses estudos mostram que há um grande potencial para a reciclagem de resíduos na cadeia produtiva da construção civil.

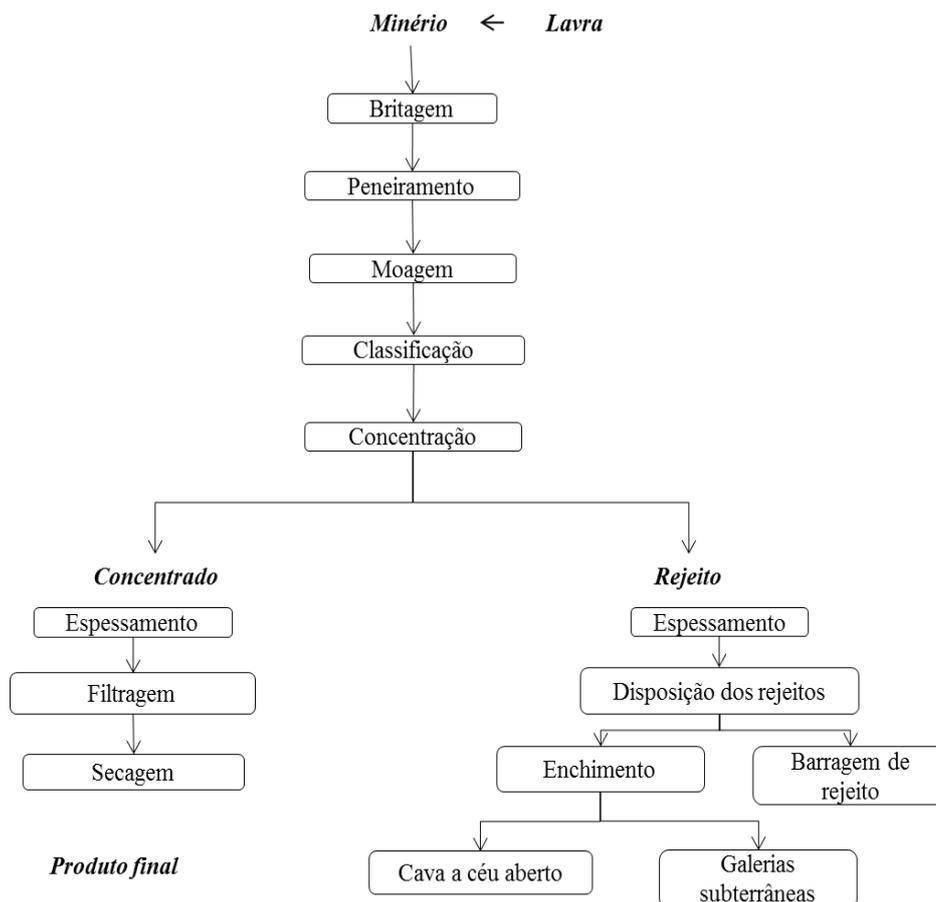
Portanto, este trabalho tem por objetivo dimensionar um sistema logístico reverso utilizando simulação computacional. Esse sistema é responsável por transportar o rejeito da mineração de minério de ferro armazenado em uma planta industrial de processamento de rejeitos extraídos de uma barragem até o local da construção de uma pavimentação rodoviária, onde o rejeito será utilizado como matéria prima. Pretende-se ainda analisar a viabilidade econômica para o sistema logístico proposto.

2 Referencial Bibliográfico

2.1 Mineração

O conjunto de atividades realizadas com o intuito de extrair o minério do depósito mineral é chamado lavra e o depósito mineral em lavra é denominado mina (Luz, Sampaio e França, 2010). No entanto, o minério extraído não se encontra nas condições adequadas para ser utilizado imediatamente. Assim, após a lavra, os minérios são submetidos a um tratamento com o objetivo de torná-los aptos à utilização, sendo que este tratamento divide o minério extraído em duas parcelas: concentrado e rejeito (Ipea, 2012). A Figura 1 apresenta o fluxograma referente ao processo de tratamento do minério.

Figura 1 - Etapas do tratamento do minério



Fonte - Luz, Sampaio e França, 2010.

No que se refere a mineração do minério de ferro, ocorre a geração de uma elevada quantidade de resíduos, dentre os quais se destacam os rejeitos gerados pelas usinas de beneficiamento depositados em barragens (Araújo, 2006; Ipea, 2012; Lozano, 2006) e os estéreis (gerados pelas

atividades de extração de minério de ferro). Um estudo realizado pelo Ipea (2012) apontou que dentre as principais substâncias responsáveis pela geração de rejeitos no setor da mineração no país, o minério de ferro representará aproximadamente 40% do total dessa geração em uma projeção até 2030.

Os rejeitos são partículas sólidas resultantes da britagem, da moagem e do tratamento químico do minério, não assumindo nenhum valor econômico (Lozano, 2006). Atualmente no Brasil, o método mais utilizado para a disposição dos rejeitos são as barragens (Ibram, 2016; Ipea, 2012).

Conforme a *International Commission on Large Dams* (ICOLD, 2012), acidentes mundiais e nacionais vêm acontecendo com barragens de rejeitos, e na maioria dos casos, as principais causas desses acidentes estão relacionadas ao balanço hídrico nessas estruturas, ao método construtivo e à gestão de segurança da operação. Dentre esses acidentes, se destacam:

- o rompimento da barragem de Fundão em 2015, situada em Mariana/MG, onde 55 milhões de metros cúbicos de rejeito de minério de ferro atingiram o município de Bento Rodrigues, destruindo 158 casas e causando a morte de 17 pessoas;
- o rompimento de uma barragem que armazenava rejeito de minério de ferro em Hubei/China no ano de 2017. Neste caso, 200.000 metros cúbicos de rejeitos inundaram uma lagoa de aproximadamente 27 hectares. Além disso, duas pessoas foram mortas e uma pessoa está desaparecida;
- o rompimento de uma barragem localizada em Barcarena/Pará em 2018, em que o rejeito proveniente de uma indústria de bauxita inundou as áreas residenciais vizinhas a barragem, inutilizando o suprimento de água potável na área.

Com o intuito de incentivar atividades direcionadas a reciclagem e ao aproveitamento de rejeitos, o Plano Nacional de Mineração 2030 afirmou que o setor deve estabelecer “diretrizes claras quanto à reciclagem de metais e de outros minérios, (...) intensificando as atividades de logística reversa, também chamada de logística ‘verde’, a qual viabilizará as atividades de reciclagem no país”. Desse modo, a logística reversa se apresenta como uma importante ferramenta que tem por objetivo auxiliar no gerenciamento dos rejeitos e conseqüentemente, possibilitar oportunidades econômicas com o seu reaproveitamento.

Por conseguinte, Leite (2003) e Chavez (2009) afirmam que a logística reversa tem como objetivo possibilitar a reintegração de um produto ou parte dele novamente ao ciclo de negócios, além de agregar valores através do planejamento de redes reversas.

Existem dois tipos de canais reversos pós-consumo: o canal aberto e o canal fechado (Leite, 2003). No canal fechado, o resíduo depois de transformado, retorna ao processo produtivo de origem; já no canal aberto, o resíduo transformado terá uma utilização distinta da que teve no canal de distribuição direto. Considera-se que a classificação para os diferentes canais de uma rede de logística reversa é relevante para este trabalho, já que este estudo analisa a viabilidade de construção de uma rede de logística reversa de canal aberto, pois o rejeito proveniente da barragem será utilizado como matéria prima na construção de uma infraestrutura de uma pavimentação rodoviária, não retornando novamente para o processo de origem.

No entanto, existem obstáculos para implantação da rede de logística reversa, dentre os quais se destacam: baixo comprometimento da alta administração; falta de mão de obra especializada para o dimensionamento da rede; falta de investimento em infraestrutura (Abdulrahman et al. 2012); tempo escasso dos decisores para o devido planejamento da rede logística reversa e a falta de estudos que avaliem os benefícios econômicos e ambientais (Hernandez et al. 2012; Gunasekaran, Ngai, 2012).

2.2 Rejeito da mineração do minério de ferro e sua utilização na cadeia produtiva da construção civil

Representando um dos principais atores da economia do país, a cadeia produtiva da construção civil contempla um conjunto de atividades que envolvem aproximadamente 12 milhões de pessoas, o que corresponde a 13% da força de trabalho brasileira (Fiesp, 2017). A Fiesp (2017) afirma que os investimentos no setor de construção representam aproximadamente 10% do Produto Interno Bruto (PIB) nacional.

Assim, o elevado potencial da cadeia produtiva da construção civil como uma grande recicladora de resíduos, se deve principalmente a dois fatores, conforme a pesquisa desenvolvida por Jonh (2000):

1. O setor é o maior consumidor de materiais na economia, e daí a sua grande possibilidade de reciclar;
2. Os variados e diferentes ramos da cadeia produtiva do setor (extração de matérias primas, arquitetura, engenharia, projetos, serviços técnicos e especializados e a indústria de máquinas e equipamentos) estão presentes em quase a totalidade das regiões do país.

Os resíduos gerados na indústria da mineração, devido a sua composição e características (materiais finos compostos por sílica, seguida de hematita, alumina e minerais minoritários) podem ser utilizados no setor da construção civil como materiais agregados de matrizes de cimento *Portland* como argamassas e concretos, na fabricação de cerâmicas e tijolos, bem como na construção de pavimentação rodoviária (Silva et al., 2014).

Dessa forma, a busca por alternativas para a utilização dos resíduos provenientes da extração do ferro, vem sendo alvo de pesquisas, que tem como foco, comprovar a viabilidade técnica de sua utilização como matéria prima na cadeia produtiva da construção civil.

Peixoto et al. (2016), Fontes et al. (2016), Marinho et al. (2014), Andrade et. al (2016) e Paula et al. (2013), buscaram comprovar a viabilidade da utilização de rejeitos da mineração de ferro na produção matrizes de cimento *Portland* e como resultados, demonstraram que o comportamento dessas matrizes compostas com rejeito, apresentou-se compatível em relação às matrizes produzidas com agregados naturais.

Yao et al. (2014) atestaram a viabilidade técnica de se utilizar rejeitos de minério de ferro na confecção de materiais cerâmicos. O trabalho realizado teve como objetivo atestar a possibilidade de se utilizar os rejeitos para desenvolver telhas cerâmicas como absorventes de micro-ondas na frequência de giga-hertz. Como resultados, os autores observaram que se podem encontrar diferentes faixas de absorção de micro-ondas simplesmente alterando a espessura da camada cerâmica.

Das, Kumar e Ramachandrarao (2000) também avaliaram a possibilidade da reutilização dos rejeitos da mineração do ferro na fabricação de telhas cerâmicas. Como resultado deste trabalho, os autores verificaram que as telhas fabricadas com o rejeito possuíam alta resistência e dureza em comparação com as telhas convencionais, além de estarem dentro dos padrões que exigem as normas.

Vieira et al. (2006) tiveram como objetivo caracterizar os rejeitos da mineração de ferro e avaliar a influência de sua adição nas propriedades físicas e mecânicas de uma massa de cerâmica vermelha. Os resultados mostraram que a granulometria dos rejeitos é adequada para incorporação em cerâmica vermelha, sendo que o rejeito incorporado na quantidade de 5% em peso, melhora a absorção de água e a resistência mecânica da cerâmica.

Chen et al. (2011) analisaram em sua pesquisa, a possibilidade de utilização de rejeitos da mineração de ferro da China para a construção de tijolos. Além dos rejeitos, foram adicionadas

ao processo argila e cinzas, obtidas de precipitadores eletrostáticos de uma usina térmica, para melhoria da qualidade do tijolo. Como principais resultados, a pesquisa demonstrou a viabilidade de se fabricar tijolos utilizando-se rejeitos da mineração de ferro, podendo a porcentagem de rejeito utilizado ser de até 84% do peso total dos compostos, observando-se os teores de água, pressão e temperatura.

Nociti (2011) constatou que ao se agregar até 5,0% de rejeitos finos da mineração à massa cerâmica para a fabricação de tijolos maciços, os mesmos atendem aos valores do módulo de ruptura à flexão exigidos pelas normas brasileiras. No entanto, o autor mostrou que valores superiores a este, provocam uma queda na resistência, não sendo favorável para tijolos estruturais.

Yellishetty et al. (2008) analisaram a adequação de resíduos da mineração de ferro, considerando tanto estéril quanto o rejeito de uma mina de ferro da Índia para uso desses elementos na construção civil. Neste estudo, concluiu-se que as partículas com granulometria de 12,5 a 20 mm são bastante adequadas para uso na fabricação de concreto. As partículas com granulometria entre 4,75 a 12,5 também foram avaliadas com êxito quando utilizadas como agregado para obras de construção diversas. E as partículas inferiores a 4,75 mm se mostraram bastante adequadas à fabricação de tijolos.

Filho et al. (2017) avaliaram a utilização de rejeitos da mineração de ferro na produção de *pavers* (blocos de concreto para pavimentação). Nesse trabalho, verificou-se que a adição de rejeitos finos de concentração de minério de ferro pode dificultar a desmoldagem dos blocos de concreto quando utilizados como agregados, porém melhoram de forma global o desempenho do material e diminuem o impacto ambiental causado pela realização da atividade mineradora.

Costa et al. (2014) obtiveram resultados relevantes sobre a viabilidade técnica do aproveitamento do rejeito da mineração de ferro como agregado na produção do concreto para a fabricação de elementos pré-fabricados destinados à pavimentação. O trabalho dos autores concluiu que, as resistências características à compressão dos blocos produzidos com rejeito, apresentaram valores muito próximos às obtidas na produção de referência da indústria.

Liu e Xu (2011) investigaram a viabilidade de substituir a areia natural utilizada na fabricação do concreto por rejeitos de minério de ferro a fim de encontrarem uma nova alternativa para se utilizar os rejeitos. Ao estudarem as propriedades mecânicas da mistura de concreto pulverizado com diferentes proporções de rejeito, encontraram a proporção ideal. O resultado do estudo

indicou que com 20% de rejeitos na substituição da areia natural, o desempenho do concreto pulverizado é o melhor.

Ismail e Hashmi (2008) examinaram a viabilidade da reutilização do rejeito de minério de ferro na fabricação de concreto. O estudo visava verificar a possibilidade de substituir parcialmente a areia utilizada na fabricação do concreto pelo rejeito e os testes realizados (*slump*, densidade fresca, densidade seca, compressão resistência e resistência à flexão) tinham por objetivo, avaliar a qualidade do concreto fabricado com o rejeito. Como principais resultados, os autores confirmaram que a utilização dos rejeitos é viável na fabricação de concreto, já que o concreto fabricado com o rejeito apresentou maiores resistências à compressão e resistência à flexão do que as misturas de concreto simples.

Bastos et al. (2016) demonstraram em seu trabalho, a viabilidade de se produzir infraestrutura para pavimentos com rejeitos de barragem de minério de ferro com desempenho adequado e que atendessem as demandas técnicas. Além disso, comprovaram que a mistura entre rejeitos de barragem de minério de ferro e outros rejeitos granulares, podem produzir uma mistura estabilizada granulometricamente de grande capacidade mecânica. Como principais resultados, os autores mostraram que utilizar o rejeito de minério de ferro é uma solução viável para uso em camadas para pavimentação rodoviária, no entanto, deixou claro, que o cimento ainda permanece como sendo o estabilizador mais eficiente para misturas sem adição de materiais granulares.

O estudo realizado por Saraiva (2006) também teve como objetivo, apresentar materiais alternativos para a construção da estrutura de pavimentos rodoviários. Sua metodologia envolveu a construção de um trecho experimental de 300 m de extensão inseridos na rodovia de ligação Itabira - Senhora do Carmo, em Minas Gerais. Foi utilizada uma mistura composta por 70% de jige, 20% de argila e 10% de rejeito fino de minério, combinados com geossintéticos. Os resultados do estudo demonstraram tecnicamente que é viável a utilização do rejeito de minério de ferro na composição de misturas para pavimentos rodoviários.

2.3 Simulação Computacional

A simulação consiste na representação dos processos de operação do mundo real ao longo do tempo através de um modelo computacional (Banks et al., 2005). Conforme autores, a simulação tem por objetivo auxiliar na compreensão do comportamento do mundo real e analisar possíveis decisões estratégicas para a sua operação.

Law (2007) ressalta que a simulação consiste na reprodução das atividades ou processos do mundo real em menor tempo e com menor custo, auxiliando os gestores no desenvolvimento de estudos a fim de prever erros que acarretariam em gastos elevados.

Dessa forma, a simulação é um método que permite prever a evolução de sistemas complexos, em que geralmente não é possível prever por meio de abordagens estáticas e analíticas (Negahban e Smith, 2014; Bodon et al., 2011). Além disso, os autores destacam que a simulação possibilita o desenvolvimento de uma interface computacional que pode ser utilizada em projetos ou em operações do sistema de fabricação, incluindo atividades de planejamento e agendamento, controle em tempo real e análise de desempenho.

Atualmente é imprescindível para as organizações investir em ferramentas sofisticadas que as permitam manipular e controlar o elevado fluxo de informações referentes ao gerenciamento de seus processos. Dentro desse cenário, o uso da simulação computacional é essencial na resolução de problemas reais, já que após a construção do modelo que representa o sistema real, é possível desenvolver um processo estruturado e com métricas quantitativas, possibilitando o melhor entendimento sobre as alternativas de solução geradas e assim, facilitar de maneira eficaz o processo decisório (Azadeh, Ghaderi e Izadbakhsh, 2008).

Conforme Kouki et al. (2017) e Andrade (2002), as principais vantagens de se utilizar a simulação para análise de sistemas são: a possibilidade do estudo e da experimentação de interações internas complexas bem como a verificação dos impactos ocorridos no sistema devido a mudanças no meio ambiente; o controle do tempo, já que nas simulações ocorre a manipulação do tempo, podendo este ser aumentado ou diminuído, sendo possível prever os impactos causados a curto, médio e longo prazo (Law, 2007); a construção de diversos cenários, os quais podem ser analisados e respondidos, fato que assume grande relevância na fase de planejamento de projeto, já que podem prever problemas e assim, diminuir o impacto causado por eles no sistema.

No entanto, existem algumas desvantagens no uso da simulação, dentre as quais se destacam: a construção do modelo de simulação necessita de experiência e tempo do desenvolvedor da simulação. Assim, modelos que realmente representem o sistema real que se deseja analisar podem ser caros, por necessitarem de longo e complexo processo de desenvolvimento (Banks et al., 2005), e por fim, as saídas do processo de simulação podem ser de difícil interpretação (Law, 2007).

Geralmente, um estudo realizado por meio de técnicas de simulação, deve ser estruturado através de etapas com métricas definidas. Banks et al. (2005) apresentam uma metodologia para a construção e análise de modelos de simulação que será adotada neste trabalho.

2.4 Análise de Viabilidade Econômica

Conforme Woiler e Mathias (1996), um estudo de viabilidade econômica consiste no processamento de informações internas e externas a organização, com o intuito de analisar uma decisão de investimento e suas implicações.

Conforme classificação proposta por Mattos (2006), um estudo de viabilidade econômica pode ser classificado como:

- Estimativa de custo: avaliação realizada com base em custos históricos e comparação com projetos similares. Neste caso, o resultado obtido consiste em um valor aproximado do custo do empreendimento;
- Orçamento preliminar: consiste em uma avaliação mais detalhada do que a estimativa de custos. Neste caso, pressupõe o levantamento de quantidades e uma pesquisa de preços dos principais insumos e serviços;
- Orçamento analítico ou detalhado: elaborado com composição de custos e longa pesquisa de preços dos insumos.

O autor destaca que um estudo de viabilidade econômica realizada via orçamento preliminar, necessita de três etapas de desenvolvimento: (1) o estudo das condicionantes (condições de contorno), (2) composição de custos e (3) fechamento do orçamento. Na etapa de estudo de condicionantes são identificados os serviços existentes na obra com suas respectivas quantidades. Na etapa de composição dos custos, cada um dos serviços integrantes da obra é associado ao seu respectivo custo. E por fim, na etapa de fechamento do orçamento é definida a lucratividade que deseja obter com o investimento na obra.

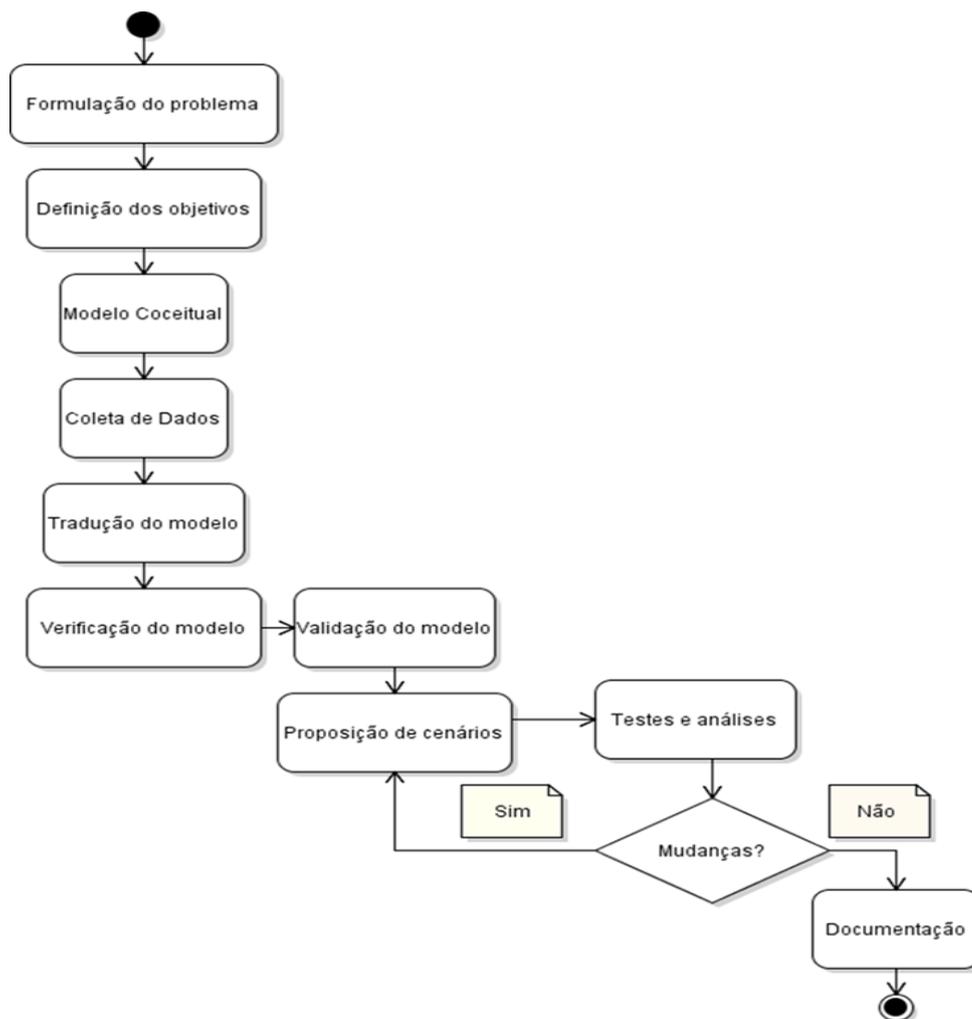
3 Metodologia

3.1 Modelo de Simulação

O estudo de simulação realizado neste trabalho foi adaptado conforme metodologia proposta por Banks et al. (2005), o qual está apresentado na Figura 2. As etapas que compõem o estudo de simulação proposto são: formulação do problema, definição dos objetivos, modelo conceitual, coleta de dados, tradução do modelo, verificação do modelo, validação do modelo, proposição de cenários, testes e análises, mudanças e documentação.

Dessa forma, essa seção apresentará de maneira detalhada os procedimentos realizados em cada uma dessas etapas, as quais serviram de guia para o desenvolvimento da proposta de simulação desenvolvida neste trabalho.

Figura 2 - Fases de um estudo de simulação



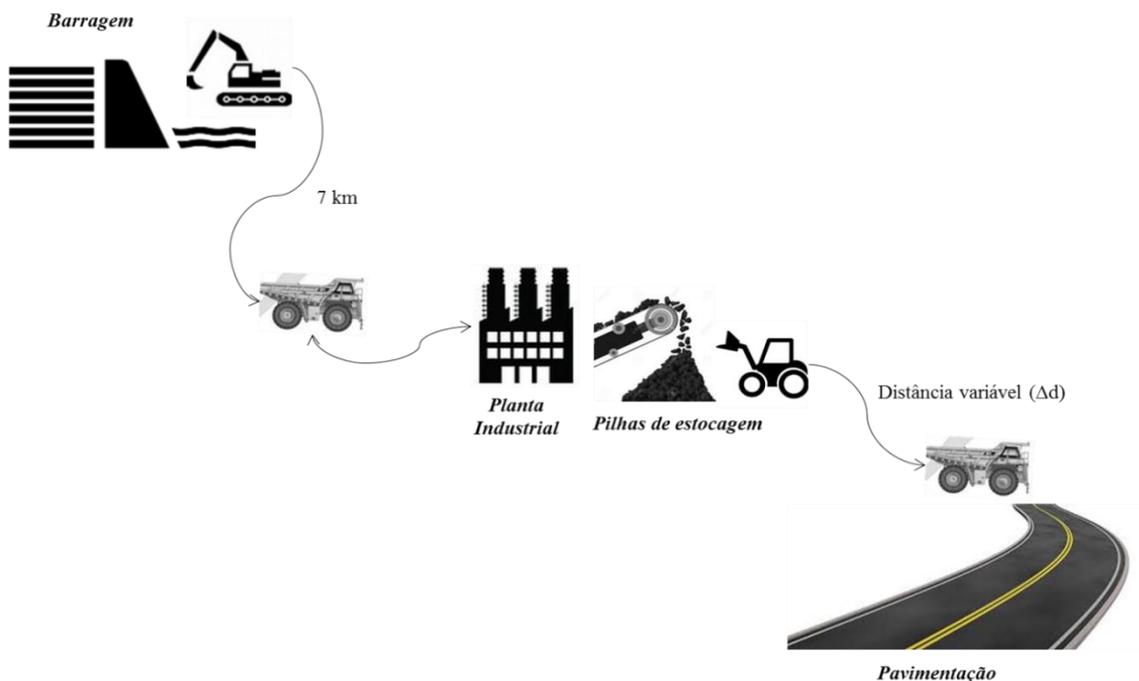
Fonte: Adaptado de Banks et al. (2005)

3.2 Formulação do Problema

Considerada uma demanda da atividade mineradora que pretende destinar os rejeitos de barragem de minério de ferro de maneira diversa aos atuais depósitos em barragens, propôs-se a utilização dos rejeitos processados em um sistema externo à mineração para a construção de uma infraestrutura para pavimentação rodoviária.

Para a viabilização desta alternativa, faz-se necessário a construção de um sistema logístico responsável por transportar o rejeito da barragem até a planta de processamento, externa à barragem, e na sequência do processamento, transportar os produtos obtidos do processamento do rejeito, até o local da construção da pavimentação. Assim, a primeira etapa desta pesquisa consistiu da caracterização do sistema logístico reverso proposto, definindo sua dinâmica de funcionamento bem como os principais elementos envolvidos. A Figura 3 esquematiza o sistema logístico proposto.

Figura 3 - Sistema logístico



O modelo proposto considera o funcionamento do sistema compreendendo: (1) a retirada do rejeito armazenado nas barragens; (2) o transporte desse material para a planta industrial, onde será processado e estocado por 48h (alternativa a paralizações por manutenção, alimentação ou dano de origem qualquer) e (3) transporte do rejeito para o local onde será construída a pavimentação.

3.3 Definição dos Objetivos

Nesta etapa, foram definidos os objetivos da simulação:

- 1- Calcular a quantidade de recursos (escavadeiras, carregadeiras e caminhões), necessários no sistema logístico de forma a atender a demanda do sistema;
- 2- Identificar as filas e restrições em todo o sistema operacional de transporte do rejeito, desde à sua retirada na barragem até o despacho para o local de construção da pavimentação;

Além da definição dos objetivos descritos acima, a descrição das atividades realizadas em cada local da infraestrutura também foi realizada, bem como a identificação dos recursos necessários para a realização de cada uma dessas atividades.

As atividades consideradas na simulação acontecem em três locais distintos: na barragem de rejeito, na planta industrial e no local onde será construída a pavimentação. Dessa forma, as seções a seguir mostrarão as especificidades inerentes a cada um desses locais, bem como a descrição das atividades realizadas.

3.3.1 Na Barragem

O local onde se iniciam as atividades do sistema a ser dimensionado é a barragem de rejeito de minério de ferro. O rejeito armazenado em forma de lama é retirado por uma escavadeira, que imediatamente carrega os caminhões, os quais transportam o rejeito da barragem até a planta industrial por uma distância de 7 km.

Assim que o rejeito é descarregado na planta industrial, os caminhões voltam a ficar disponíveis para serem novamente abastecidos pela escavadeira, dando origem ao primeiro fluxo de caminhões do modelo de simulação denominado barragem / planta.

3.3.2 Na Planta Industrial

O rejeito é descarregado na planta industrial, onde permanece armazenado por 48 horas, para então ser processado e depositado nas pilhas de estocagem. O transporte do rejeito entre a planta industrial e as pilhas de estocagem é realizado por correias transportadoras, de 100, 60 e 20 m de comprimento.

Um recurso carregadeira alimenta as correias transportadoras com o rejeito processado na planta industrial. Cada uma dessas correias é responsável por formar 8 pilhas de rejeito, sendo necessárias 398 toneladas de rejeito para formar uma pilha em 1 hora. Assim, a primeira correia a ser utilizada permanece 8 horas ligada, transportando portanto, 3.184 toneladas de rejeito para as pilhas. Assim que essa quantidade transportada é atingida, a primeira correia é desligada e imediatamente a segunda correia entra em funcionamento, iniciando o mesmo processo de preenchimento de pilhas. Assim que a correia 2 enche 8 pilhas de rejeito, ela é desligada e a terceira correia entra em funcionamento, enchendo mais 8 pilhas. Logo que a terceira correia termina de formar as 8 pilhas, a primeira correia é ligada e reinicia-se o processo de enchimento das pilhas.

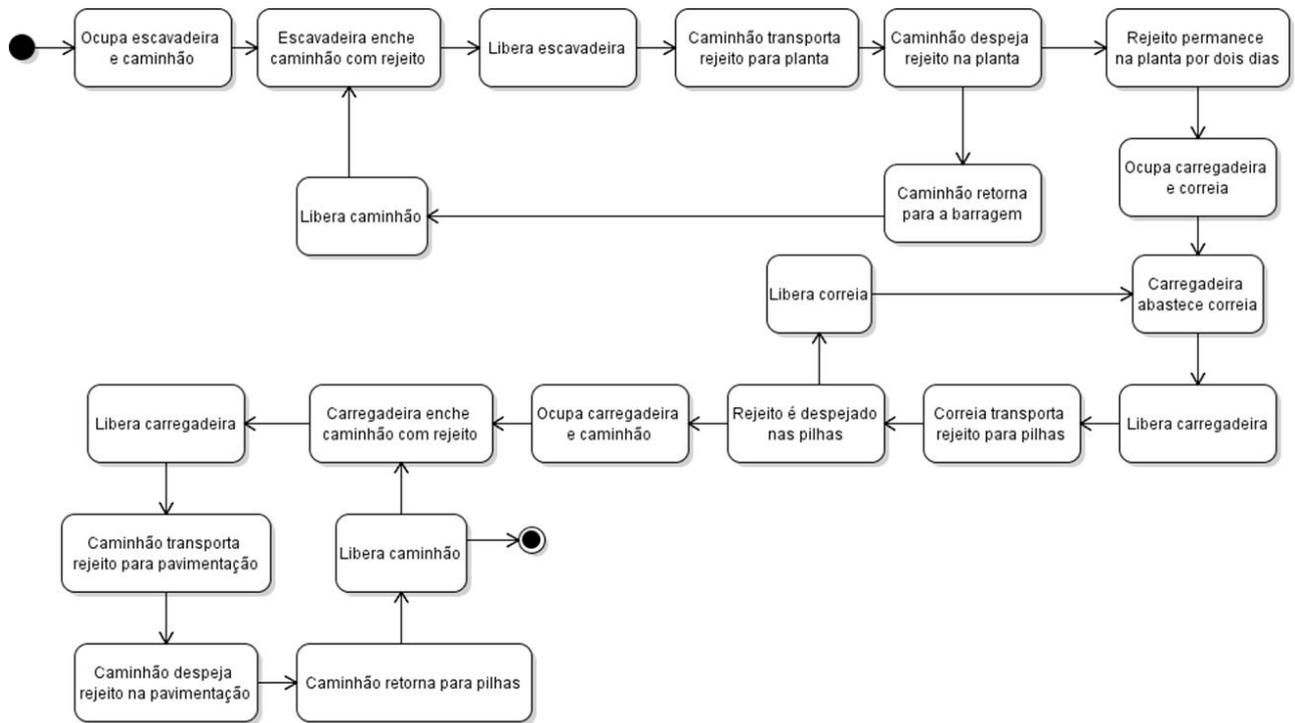
3.3.3 No Local da Pavimentação

O rejeito estocado nas pilhas é retirado por uma carregadeira que abastece os caminhões, os quais transportarão o rejeito até o local da construção da pavimentação. Assim que o caminhão descarrega o rejeito na pavimentação, ele retorna ao local das pilhas e volta a ficar disponível novamente para ser abastecido pela carregadeira, dando origem ao segundo fluxo de caminhões do modelo denominado *pilhas/barragem*.

3.4 Modelo Conceitual

O modelo de simulação apresentado de forma conceitual teve como objetivo traduzir o fluxo de atividades do sistema real para uma linguagem sequencial, analítica e lógica, conforme apresentado na Figura 4.

Figura 4 - Modelo conceitual



No modelo conceitual não foram consideradas as especificidades do sistema real no modelo, tais como: tempo gasto pelos recursos para executar as atividades, quantidade de recursos e custos envolvidos, lembrando que o objetivo dessa fase é a construção de um modelo simplificado.

3.5 Coleta de Dados

Esta etapa consistiu em identificar os dados que abastecem o simulador, os quais podem ser classificados como:

- 1- *Dados de entrada*: provenientes das características específicas do sistema estudado;
- 2- *Dados de controle*: os quais terão seus valores iniciais obtidos através da simulação do sistema, e que serão aprimorados e ajustados a cada simulação.

Os dados de entrada utilizados no modelo de simulação estão apresentados conforme Quadro 1.

Quadro 1 - Dados de entrada

Parâmetros	Descrição	Capacidade
Capacidade escavadeira	Capacidade da escavadeira	9 ton
Capacidade carregadeira_planta	Capacidade da carregadeira alocada na planta industrial	9 ton
Capacidade carregadeira_pilha	Capacidade da carregadeira alocada na pilha de estocagem	9 ton
Capacidade caminhao_entrada	Capacidade dos caminhões ciclo: <i>barragem / planta</i>	22 ton
Capacidade caminhão_saida	Capacidade dos caminhões ciclo: <i>pilha /pavimentação</i>	40 ton
Comprimento da correia1	Comprimento da correia transportadora 1	100 m
Comprimento da correia2	Comprimento da correia transportadora 2	60 m
Comprimento da correia3	Comprimento da correia transportadora 3	20 m
Distância barragem_planta	Distância entre o local da barragem e a planta industrial	7 km
Tempo de secagem	Tempo de secagem do rejeito na planta industrial	2 dias

Já os dados de controle utilizados no modelo de simulação podem ser observados conforme Quadro 2.

Quadro 2 - Dados de Controle

Parâmetros	Descrição	Capacidade
Número de caminhões_entrada	Número de caminhões alocados no ciclo: <i>barragem / planta</i>	unidades
Número de caminhões_saída	Número de caminhões alocados no ciclo: <i>pilha / pavimentação</i>	unidades
Conta rejeito	Quantidade de rejeito contido na planta industrial	ton
Conta rejeito pilhas	Quantidade de rejeito contido nas pilhas	ton
Taxa de ocupação escavadeira	Taxa de ocupação da escavadeira alocada na barragem	%
Taxa de ocupação carrega_planta	Taxa de ocupação da carregadeira alocada na planta industrial	%
Taxa de ocupação carrega_pilha	Taxa de ocupação da carregadeira alocada na pilha de estocagem	%
Taxa de ocupação caminhão_entrada	Taxa de ocupação dos caminhões no ciclo: <i>barragem / planta</i>	%
Taxa de ocupação caminhão_saída	Taxa de ocupação dos caminhões no ciclo: <i>pilha / pavimentação</i>	%

O Quadro 3 apresenta os dados probabilísticos adotados como dados de entrada do modelo de simulação. Nota-se que todos os parâmetros descritos no Quadro 3 utilizam a distribuição de probabilidade normal (NORM (média, desvio padrão)), em que médias foram estimadas baseadas nas distâncias entre os locais em que o rejeito deve ser transportado e no tempo gasto pelos recursos para realizar uma atividade. Para os valores referentes aos desvios, foi assumido o valor de 10%, uma vez que a variabilidade nesse tipo de sistema não é alta, conforme observado por Ribeiro (2015).

Quadro 3 - Expressões probabilísticas utilizadas como parâmetros de entrada do modelo de simulação

Parâmetro	Descrição	Valor	Unidade
T_carrega_barragem	Expressão que define o tempo de carga do caminhão na barragem	NORM (1.5, 0.15)	minutos
T_deslc_caminhao_entrada	Expressão que define o tempo de transporte do rejeito da barragem para planta industrial	NORM (10.5,1.05)	minutos
T_descarga_planta	Expressão que define o tempo de descarga do caminhão na planta	NORM (2.0, 0.2)	minutos
T_carrega_correia	Expressão que define o tempo de carregamento das correias	NORM (1.5, 0.15)	minutos
T_carrega_pilha	Expressão que define o tempo de carga do caminhão nas pilhas	NORM (4.5, 0.45)	minutos
T_deslc_caminhao_saida	Expressão que define o tempo de transporte do rejeito das pilhas para pavimentação	NORM (média, desvio padrão). Esta expressão varia conforme variações nos valores das distâncias entre as pilhas e a pavimentação.	minutos

3.6 Tradução do Modelo

Nessa etapa, o modelo conceitual desenvolvido anteriormente foi traduzido em uma linguagem computacional para que a simulação de fato iniciasse. O modelo de simulação foi construído em um *software* dedicado para estudos de simulação.

3.7 Verificação do Modelo

Depois de construído o modelo de simulação, havia a necessidade de atestar a execução correta pelo *software*. Para tanto, foi realizada uma simulação a fim de verificar se os parâmetros de entrada e a estrutura lógica foram inseridos de forma correta no modelo.

Ao final desse teste, observou-se que os elementos representados estavam inseridos corretamente e, portanto a verificação foi concluída.

3.8 Validação do Modelo

Nesta etapa, o modelo de simulação foi calibrado através de um método interativo em que os dados de controle foram ajustados até que os dados de entrada e as restrições do sistema fossem satisfeitos.

3.9 Proposição de Cenários

Nesta etapa, definiram-se as alternativas (cenários) que se queria simular:

- 1- Cenário 1: composto por caminhões transportando os rejeitos no trajeto *barragem / planta*;
- 2- Cenário 2: composto por correias transportadoras transportando o rejeito no trajeto *barragem / planta*;

3.10 Testes e Análises; Mudanças e Documentação

Nesta fase, os testes começaram a ser executados pela simulação e com o objetivo de verificar se os resultados obtidos estavam coerentes, estabeleceram-se algumas medidas de desempenho. Neste caso, os indicadores considerados foram: a taxa de utilização dos recursos escavadeira, carregadeira e caminhões.

Logo em seguida, na etapa *Mudanças*, verificou-se que a simulação estava alinhada com os objetivos pré-determinados e, portanto, não houve a necessidade de se executar mais iterações com a adição de novos parâmetros.

A etapa de *Documentação e Relatório* consistiu em arquivar os relatórios gerados pelo *software* de simulação e o próprio desenvolvimento desse trabalho, o qual relatou de forma detalhada todas as etapas necessárias para que o estudo de simulação pudesse ser realizado.

3.11 Viabilidade Econômica

A análise da viabilidade econômica proposta consiste em um orçamento preliminar, já que houve o levantamento dos custos envolvidos em cada local do sistema dimensionado, os quais foram

associados às quantidades de cada insumo (obtidas por meio do estudo de simulação realizado anteriormente).

Os custos referentes ao valor de aquisição dos caminhões (22 ton e 40 ton) foram retirados da plataforma *online* disponibilizada pela Fundação Instituto de Pesquisas Econômicas (FIPE). Já os custos referentes ao valor de aquisição da escavadeira e carregadeira, bem como os custos inerentes ao operador de cada equipamento foram retirados do Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil (SINAPI), plataforma *online* desenvolvida e disponibilizada pela Caixa Econômica Federal. Já os custos referentes ao valor de aquisição das correias transportadoras foram obtidos e adaptados através dos dados disponibilizados pelo estudo de Ribeiro et al. (2016).

O rejeito transportado até o local da construção da pavimentação será utilizado como matéria prima em substituição dos materiais finos granulares convencionalmente utilizados para construção de infraestrutura de pavimentação. Conforme SINAPI (2018), o preço médio de uma tonelada de areia é R\$ 25,00. Por isso, o custo de R\$ 25,00 por tonelada de rejeito transportado foi adotado como parâmetro para atestar a viabilidade econômica de construção do sistema logístico.

O tempo previsto de funcionamento do sistema é 20 anos, sendo este valor considerado nos cálculos dos custos de aquisição, manutenção, mão de obra, juros e combustível. Diante disso, os custos totais referentes a cada um dos locais do sistema logístico foram obtidos conforme Quadro 4.

Quadro 4 - Custos do sistema logístico referentes aos 2 cenários de simulação

Cenário de simulação 1			Cenário de simulação 2		
Na Barragem			Na Barragem		
Equipamento	Descrição dos custos	Cálculo dos custos	Equipamento	Descrição dos custos	Cálculo dos custos
Escavadeira (C _E)	Valor de aquisição (V _A); Valor residual (V _R); Juros (J); Manutenção (M); Combustível (C); Operador (O).	C _B = C _E + C _{CCE} + C _M B	Escavadeira (C _E)	Valor de aquisição (V _A); Valor residual (V _R); Juros (J); Manutenção (M); Combustível (C); Operador (O).	C _B = C _{CTB} + C _{CCE} + C _M B
Caminhão entrada (C _{CE})	Valor de aquisição (V _A); Valor residual (V _R); Juros (J); Manutenção (M); Combustível (C); Operador (O).		Correias transportadoras (C _{CTB})	Valor de aquisição (V _A); Valor da estrutura metálica (V _M); Juros (J); Manutenção (M); Consumo de eletricidade (E).	

Custo de Manutenção da Barragem (C_{MB})	Custo de Manutenção da Barragem		Custo de Manutenção da Barragem (C_{MB})	Custo de Manutenção da Barragem	
Na Planta Industrial			Na Planta Industrial		
Carregadeira (C_{CAR1})	Valor de aquisição (V_A); Valor residual (V_R); Juros (J); Manutenção (M); Combustível (C); Operador (O).	$C_{PI} = C_{CAR1} + C_{CT}$	Carregadeira (C_{CAR1})	Valor de aquisição (V_A); Valor residual (V_R); Juros (J); Manutenção (M); Combustível (C); Operador (O).	$C_{PI} = C_{CAR1} + C_{CT}$
Correias transportadoras (C_{CT})	Valor de aquisição (V_A); Valor da estrutura metálica (V_M); Juros (J); Manutenção (M); Consumo de eletricidade (E).		Correias transportadoras (C_{CT})	Valor de aquisição (V_A); Valor da estrutura metálica (V_M); Juros (J); Manutenção (M); Consumo de eletricidade (E).	
Nas Pilhas de Estocagem			Nas Pilhas de Estocagem		
Carregadeira (C_{CAR2})	Valor de aquisição (V_A); Valor residual (V_R); Juros (J); Manutenção (M); Combustível (C); Operador (O).	$C_P = C_{CAR2} + C_{CS}$	Carregadeira (C_{CAR2})	Valor de aquisição (V_A); Valor residual (V_R); Juros (J); Manutenção (M); Combustível (C); Operador (O).	$C_P = C_{CAR2} + C_{CS}$
Caminhão saída (C_{CS})	Valor de aquisição (V_A); Valor residual (V_R); Juros (J); Manutenção (M); Combustível (C); Operador (O).		Caminhão saída (C_{CS})	Valor de aquisição (V_A); Valor residual (V_R); Juros (J); Manutenção (M); Combustível (C); Operador (O).	

O custo específico de cada equipamento (C_{EQ}) foi calculado conforme equação 4.1.

$$C_{EQ} = V_A - V_R + (J+M+C+O) \quad (4.1)$$

Em seguida, foram realizadas variações nas distâncias entre as pilhas de estocagem e o local da pavimentação e para cada variação da distância, foi calculado o custo referente a aquela variação. Esse procedimento foi realizado (em ambos os cenários de simulação) com o intuito de calcular os custos envolvidos em cada uma das distâncias e encontrar a distância equivalente ao custo de R\$ 25,00 por tonelada de rejeito transportada.

4 Resultados e Discussões

O resultado obtido da simulação apresenta as quantidades finais de cada recurso presente no sistema logístico, como observado no Quadro 5.

Quadro 5 - Resultado da simulação

Cenário 1								
Na Barragem			Na Planta Industrial			Nas Pilhas de Estocagem		
<i>Recurso</i>	<i>Qtd.</i>	<i>Capacidade</i>	<i>Recurso</i>	<i>Qtd.</i>	<i>Descrição</i>	<i>Recurso</i>	<i>Qtd.</i>	<i>Capacidade</i>
Escavadeira	1	9 ton	Carregadeira	1	9 ton	Carregadeira	1	9 ton
Caminhão	14	22 ton	Correias transportadoras	3	100m; 60m; 20m.	Caminhão	Variável conforme distância. (Ver Tabela 1)	40 ton
Cenário 2								
Na Barragem			Na Planta Industrial			Nas Pilhas de Estocagem		
<i>Recurso</i>	<i>Qtd.</i>	<i>Capacidade</i>	<i>Recurso</i>	<i>Qtd.</i>	<i>Descrição</i>	<i>Recurso</i>	<i>Qtd.</i>	<i>Capacidade</i>
Escavadeira	1	9 ton	Carregadeira	1	9 ton	Carregadeira	1	9 ton
Correia transportadora	1	7 km	Correias transportadoras	3	100m; 60m; 20m.	Caminhão	Variável conforme distância. (Ver Tabela 1)	40 ton

A Tabela 1 mostra a quantidade de caminhões necessária para transportar o rejeito estocado nas pilhas até a pavimentação, para diferentes valores de distância. Como observado na Tabela 1, as quantidades de caminhões são as mesmas para ambos os cenários. Isso ocorre porque a quantidade de caminhões necessária para transportar o rejeito das pilhas para o local da pavimentação não é impactada quando se muda o transportador do rejeito da barragem para a planta. A quantidade de caminhões é definida conforme a quantidade de rejeito estocada nas pilhas e esta é a mesma para ambos os cenários, considerando que a quantidade de rejeito transportada pelas correias é a mesma quantidade transportada pelos caminhões.

Tabela 1 - Distâncias e caminhões (pilhas/pavimentação)

Cenários 1 e 2	
Distância entre pilhas de estocagem e pavimentação (km)	Quantidade de caminhões
30	14
50	21
70	30
90	38
110	46
130	54
150	62
170	70
190	78
210	86
230	94
250	102
270	110
290	118
310	126

Depois de obtidos os custos referentes a cada distância, foi encontrada a distância equivalente ao custo de R\$ 25,00 por tonelada de rejeito transportada em ambos os cenários, conforme Tabela 2.

Tabela 2 - Custo médio de transporte / tonelada de rejeito

Distância entre pilhas de estocagem e pavimentação (km)	Cenário 1 R\$/ton	Cenário 2 R\$/ton
30	6,97	14,15
50	8,16	15,34
70	9,70	16,88
90	11,06	18,24
110	12,43	19,61
130	13,79	20,97
150	15,16	22,34
170	16,52	23,70
190	17,89	25,07
210	19,25	26,43
230	20,62	27,79
250	21,98	29,16
270	23,34	30,52
290	24,71	31,49
310	26,07	33,25

Como observado na Tabela 2, o sistema logístico dimensionado em ambos os cenários é economicamente viável, já que foram encontradas distâncias consideráveis entre as pilhas de estocagem e o local da construção da pavimentação, em que o custo por tonelada de rejeito transportada é menor que R\$ 25,00. No entanto, o Cenário 1 apresentou-se como melhor alternativa, já que admitiu uma distância maior (290 km) para o transporte do rejeito quando comparado com o Cenário 2 (170 km). Isso acontece devido ao maior custo de investimento considerando a adoção de uma correia transportadora de 7 km para o transporte do rejeito entre o local da barragem e as pilhas de estocagem, quando comparado com o transporte realizado por meio de caminhões.

Resultados semelhantes ao obtido por este trabalho, também foram encontrados por Nehring et al. (2017), Ferreira e Leite (2015), Lopes (2010) e Ribeiro et al. (2016)

Nehring et al. (2017) realizou um estudo comparativo entre a utilização de caminhões e correias transportadoras em atividades de transporte de uma mineradora. Como resultados, os autores destacaram que a substituição dos caminhões pelas correias transportadoras inegavelmente traz vantagens ambientais, no entanto, para que seja economicamente viável, é necessário considerar: (1) o volume de materiais transportados deve ser alto para justificar o elevado investimento inicial na aquisição das correias; (2) a vida útil do projeto deve ser superior a 10 anos para que o investimento inicial seja pago e (3) os custos de eletricidade devem ser 25% menor que o custo do diesel.

Ferreira e Leite (2015) verificaram a possibilidade de substituir o uso de caminhões por correias transportadoras em atividades de transportes realizadas em mina e ao final, concluíram que em termos ambientais, o transporte realizado por correias transportadoras movidas a eletricidade é mais eficiente do que o transporte realizado por caminhões, já que a matriz energética brasileira tem participação significativa de usinas hidrelétricas.

Lopes (2010) e Ribeiro et al. (2016) destacaram vantagens na utilização de correias transportadoras bem como na utilização de caminhões para a realização do transporte em atividades de mineração. Conforme autores, as vantagens referentes as correias são: número baixo de operadores, já que um ou dois são suficientes para monitorar longos trechos de correias em operação; os transportes não são interrompidos devido a chuvas e neblinas, garantindo a taxa de alimentação do sistema e os riscos de acidentes são reduzidos devido ao número de baixo de equipamentos envolvidos nas operações. Já as vantagens no uso de caminhões, o autor destaca a: flexibilidade operacional alta, podendo o equipamento ser transferido para outras frentes de

operação; tempo de início de utilização imediato, pois os caminhões são pré-montados na fábrica e transportados, bastando montar o conjunto total no local da obra; a construção de estradas para que os caminhões comecem as operações são reduzidos e as atividades não são interrompidas quando uma unidade de transporte é paralisada por problemas de manutenção.

5 Conclusão

Este trabalho realizou o dimensionamento e a análise econômica de um sistema logístico reverso responsável por transportar o rejeito armazenado em uma barragem até o local em que será utilizado como matéria prima na construção de uma pavimentação. O dimensionamento do sistema teve como base a minimização dos custos logísticos e foi desenvolvido via simulação, considerada uma ferramenta adequada para analisar processos de tomada de decisão como o sistema estudado, visto que este possui variáveis de natureza estocástica e está sujeito à restrições de capacidade dos recursos e limitações operacionais.

Dessa forma, foi apresentado o desenvolvimento detalhado de um estudo de simulação, descrevendo com detalhes as etapas de construção do modelo. Como resultados da simulação foram obtidas as quantidades dos recursos necessárias no sistema logístico, as quais foram associadas aos seus respectivos custos.

Ao final do trabalho, foi comprovada a viabilidade econômica de construção do sistema logístico para os dois cenários considerados, já que foram encontradas distâncias entre as pilhas de estocagem e o local da construção da pavimentação em que o custo por tonelada de rejeito transportada é menor que R\$ 25,00. O Cenário 1 apresentou-se como melhor alternativa, admitindo uma distância de 290 km para o transporte do rejeito, e o Cenário 2 uma distância de 170 km, sendo portanto, a proposta do Cenário 1 melhor em termos econômicos do que o Cenário 2.

6 Referências

- Abdulrahman, M, D; Gunasekaran, A; Subramanian, N. **Critical barriers in implementing reverse logistics in the Chinese manufacturing sectors**. International Journal of Production Economics, v.138, n.2, p.1-12, 2012.
- Adiansyah, J.S; Rosano, M; Vink, S; Keir, G. **A framework for a sustainable approach to mine tailings management: disposal strategies**. Journal Cleaner Production, v. 108, 2015.
- Andrade, L, C, R; Marques, E, A, G; Peixoto, R. A. F. **Perspectivas para o reaproveitamento de rejeitos da mineração de ferro como materiais de construção**. Geografias, v. 12, p. 32-44, 2016.
- Andrade, E, L. **Introdução à Pesquisa Operacional. Métodos e modelos para a análise de decisões**. Terceira edição. Rio de Janeiro: LTC, 2002. 192 p.
- Araújo, C, B. **Contribuição ao estudo do comportamento de barragens de rejeito de mineração de ferro**. Rio de Janeiro, 2006. 143 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Azadeh, A.; Ghaderi, S.; Izadbakhsh, H. **Integration of dea and a hp with computer simulation for railway system improvement and optimization**. Applied Mathematics and Computation, v. 195, n. 2, p. 775–785, 2008.
- Bacci, D, L, C; Landim, P, M, B; Eston, S, M. **Aspectos e impactos ambientais de pedreira em área urbana**. Revista Escola de Minas (REM), Ouro Preto, p.47-54, 2006.
- Banks, J. et al. **Discrete - event system simulation**. Quarta edição. New Jersey: Prentice Hall, 2005. 606 p.
- Bastos, L, A, C; Mendes, J, C; Silva, G, C; Peixoto, R, A, F. **Using iron ore tailings from tailing dams as road material**. Journal of Materials in Civil Engineering, v. 28, 2016.
- Bodon, P. et al. **Modeling the mining supply chain from mine to port: a combined optimization and simulation approach**. Journal of Mining Science, Springer, v. 47, n. 2, p. 202–211, 2011.
- Burritt, R, L; Christ, K, L. **Water risk in mining: Analysis of the Samarco dam failure**. Journal of Cleaner Production, v. 178, p. 196–205, 2018.

Cabral, L. N; Pereira, S. S.; Alves, T. L. B. **Degradação ambiental e implicações para a saúde humana decorrentes da mineração: o caso dos trabalhadores de uma pedreira no município de Campina Grande/PB.** Hygeia, Uberlândia, v. 8, n. 15, 2012.

Campanha, A. **Caracterização de rejeitos de minério de ferro para uso em pavimentação.** Viçosa, 2011. 106 p. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Viçosa.

Chaves, G, L, D. **Logística Reversa de pós venda para alimentos derivados da carne e do leite: análises do retorno de distribuição.** São Carlos, 2009. 303 p. Tese de Doutorado, Universidade Federal de São Carlos.

Chen, Y; Zhang, Y; Chen, T; Zhao, Y. **Preparation of eco-friendly construction bricks from hematite tailings.** Construction and Building Materials, v. 25, p 2107–2111, 2011.

Costa, A, V; Gumieri, A, G; Brandao, P, R, G. **Piso intertravado produzido com rejeito de sinter feed.** Estrutura e Materiais, São Paulo , v. 7, n. 2, Abril, 2014.

Das, S, K; Kumar, S; Ramachandrarao, P. **Exploitation of iron ore tailing for the development of ceramic tiles.** Waste Management, v. 20, p. 725-729, 2000.

Federação das Indústrias do Estado de São Paulo (FIESP). **Mapa da cadeia produtiva da construção.** Disponível em < <http://www.fiesp.com.br/infografico-cadeia-da-construcao/>>. Acesso em: 20 de março de 2017.

Ferreira, H; Leite, M, G, P. **A Life Cycle Assessment (LCA) study of iron ore mining.** Journal of Cleaner Production, v. 10, p. 1081-109, 2015.

Filho, J, N, S; Silva, S, N; Silva, G, S; Mendes, J, C; Peixoto, R, A, F. **Technical and environmental feasibility of interlocking concrete pavers with iron ore tailings from tailings dams.** American Society of Civil Engineers, 2017.

Fontes, W, C; Mendes, J, C; Silva, S, N; Peixoto, R, A, F. **Mortars for laying and coating produced with iron ore tailings from tailing dams.** Construction and Building Materials, v. 112, p. 988 – 995, 2016.

Fourie, A.B. **Perceived and realised benefits of paste and thickened tailings for surface deposition.** 15 Seminário Internacional Paste and Thickened Tailings, 2012, Perth, Africa.

Franks A, N; David, V; Boger, B; Claire, M; Mulligan, D. **Sustainable development principles for the disposal of mining and mineral processing wastes**. Resources Policy, v. 36, p. 114–122, 2011.

Gunasekaran, A., Ngai, E.W.T. **The future of operations management: an outlook and analysis**. International Journal of Production Economics, v.135, n.2, p. 687-701, 2012.

Gonçalves, D, R, R; Fontes, W, C; Mendes, J, C; Silva, G, J, B; Peixoto, R, A, F. **Evaluation of the economic feasibility of a processing plant for steelmaking slag**. Waste Management & Research, 2015.

Hernandez, C.T.; Marins, F.A.S.; Castro, R.C. **Modelo de gerenciamento da Logística Reversa**. Gestão da Produção, v. 19, n. 3, p. 1-12, 2012.

Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. **Relatório Diagnóstico dos resíduos sólidos da atividade de mineração de substâncias não energéticas**. Brasília, 2012. Disponível em <http://www.en.ipea.gov.br/agencia/images/stories/PDFs/relatoriopesquisa/120814_relatorio_atividade_mineracao.pdf>. Acessado em 05 de Dezembro de 2017.

International Commission on Large Dams. Disponível em <<http://www.icold-cigb.org/>>. Acessado em 13 de Março de 2017.

Instituto Brasileiro de Mineração. **Informações e análises da economia mineral brasileira**. 11^a edição. Disponível em: <<http://www.ibram.org.br/>>. Acessado em 15 de fevereiro de 2017.

Ismail, Z, Z; Hashmi, E, A. **Use of waste plastic in concrete mixture as aggregate replacement**. Waste Management, v. 28, p. 2041-2047, 2008.

Ismail, Z, Z; Hashmi, E, A. **Reuse of waste iron as a partial replacement of sand in concrete**. Waste Management, v. 28, p. 2048 – 2053, 2008.

Jones, H; Boger, D, V. **Sustainability and waste management in the resource industries**. Industrial and Engineering Chemistry Research, 2012. Disponível em <<https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ie202963z>>. Acessado em 03 de Janeiro de 2018.

Jonh, V, M. **Reciclagem de resíduos na construção civil: contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento**. São Paulo, 2000. 113 p. Tese (Doutorado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Kinnunen, P; Ismailov, A; Solismaa, S; Sreenivasan, H; Räisänen, M; Levänen, E; Illikainen, M. **Recycling mine tailings in chemically bonded ceramics – A review.** Journal of Cleaner Production, v. 174, p. 634-649, 2017.

Kouki, M; Cardin, O; Castagna, P; Cornardeau, C. **Input data management for energy related discrete event simulation modeling.** Journal of Cleaner Production, v. 141, p. 194-207, 2017.

Law, A, M. **Simulation Modeling and Analysis.** Mc Graw Hill, Arizona, Estados Unidos 2007, 786 p.

Liu, W. Xu, X., An, Y. **Study on Sprayed Concrete with Iron Tailings.** Advanced Materials Research, v. 347-353, p. 1939-1943, Trans Tech Publications, Switzerland, 2012.

Lopes, J, R. **Viabilização técnica e econômica da lavra contínua de minério de ferro com o uso de sistema de britagem móvel “in pit” auto-propelido.** Ouro Preto, 2010, 105 p. Dissertação (Mestrado), Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto.

Lozano, F, A, E. **Seleção de locais para barragens de rejeitos usando o método de análise hierárquica.** São Paulo, 2006, 128p. Dissertação (Mestrado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Luo, L., Zhang, Y., Bao, S., Chen, T. **Utilization of Iron Ore Tailings as Raw Material for Portland Cement Clinker Production.** Journal Advances in Materials Science and Engineering, 2016. Disponível em <<https://www.hindawi.com/journals/amse/2016/1596047/>>. Acessado em 08 de Janeiro de 2018.

Luz, A, B; Sampaio, J, A; França, S. C. A. **Tratamento de Minérios.** 5ª edição. CETEM. Rio de Janeiro, 2010.

Marinho, A, L, B; Franco, L, C; Chibli, P, A; Silva, G, B; Peixoto, R, A, F. **Produção de ligantes para argamassa obtida a partir da reciclagem de resíduo sólido de siderurgia – Escória de Forno Panela.** Artigo, Anais do 50º Congresso Brasileiro de Concreto, 2014.

Mattos, A, D. **Como preparar orçamentos de obras. Dicas para orçamentistas, estudos de caso, exemplos.** PINI, São Paulo, 2006, 286 p.

Morgenstern, N, R; Vick, S, G; Viotti, C, B; Watts, B, D. **Fundão tailings dam review panel. Report on the immediate causes of the failure of the Fundão dam.** Disponível em

<<http://fundaoinvestigation.com/wp-content/uploads/general/PR/en/FinalReport.pdf>>.

Acessado em 03 de Fevereiro de 2018.

Negahban, A; Smith, J, S. **Simulation for manufacturing system design and operation: Literature review and analysis**. *Jornal Manuf. Syst*, v. 33, p. 241–261, 2014.

Nehring, M; Knights, P, F; Kizil, M, S; Hay, E. **A comparison of strategic mine planning approaches for in-pit crushing and conveying, and truck/shovel systems**. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2017.

Nociti, D. M. **Aproveitamento de rejeitos oriundos da extração de minério de ferro na fabricação de cerâmicas vermelha**. Guaratinguetá, 2011.101 p. Dissertação (Mestrado), Universidade Estadual Paulista.

Paula, D, P; Santos, D, H; Okada, E, M; Souza, B, P; Fontes, W, C; Peixoto, R, A, F. **Argamassas de escória de aciaria para revestimento de alvenarias e revestimentos**. Artigo, X Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassa, Fortaleza, 2013.

Peixoto, R, F, A; Batista, J, O, S; Costa, E, C, P; Santos, D, H; Filho, J, N, S; Bastos, L, A, C; Fontes, W, C; Mendes, J, C. **Utilização de rejeitos de barragens de minério de ferro na construção civil**. Relatório técnico, Universidade Federal de Ouro Preto, 2016. Disponível em <http://www.reciclos.ufop.br/media/uploads/downloads/Relatorio_MPF-FIOROTTI.pdf>.

Acessado em 15 de Fevereiro de 2018.

Ribeiro, B, G, C; Souza, W, T; Luz, J, A, M. **Feasibility project for implementation of conveyor belts in an iron ore mine. Study case: Fabrica Mine in Minas Gerais State, Brazil**. *Revista Escola de Minas (REM)*, v.69, 2016.

Ribeiro, C, M. **Modelagem e simulação de sistemas a eventos discretos via redes de PETRI estocásticas: aplicação em mineração**. Belo Horizonte, 2015. 89 p. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Minas Gerais.

Sabat, V; Shaikh, M; Kanap, M; Chaudhari, M; Suryawanshi, S; Knadgouda, K. **Use of iron ore tailings as a construction material**. *International Journal of Conceptions on Mechanical and Civil Engineering*, v. 3, 2015.

Saraiva, S, L, C. **Metodologia e análise experimental do comportamento geotécnico da estrutura de pavimentos rodoviários**. Ouro Preto, 2006. 145 p. Dissertação (Mestrado), Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Ouro Preto.

Silva, F, L; Araújo, F, G, S; Castro, C, G; Mendes, J, J; Krüger, F, L. **Recycling of concentration tailings of iron ore for the production of concrete block (pavers)**. Key Engineering Materials, v. 755-756, p. 631- 634, 2014.

Shettima, A. U., Hussin, M. W., Ahmad, Y., Mirza, J. **Evaluation of iron ore tailings as replacement for fine aggregate in concrete**. Construction and Building Materials, v. 29, p. 72-79, 2016.

Vergara, J, E. **Aplicabilidade dos rejeitos de mineração de ferro para utilização em filtros de barragens**. Brasília, 2012. 129 p. Dissertação (Mestrado), Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Brasília.

Vieira, C, M, F; Souza, C, C; Monteiro, S, N. **Efeito da incorporação de resíduo de minério de ferro nas propriedades e microestrutura da cerâmica argilosa**. 17º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Foz do Iguaçu, Paraná, Brasil. 2006.

Wolff, A, P. **Caracterização de rejeitos de minério de minas da Vale**. Ouro Preto, 2009. 107 p. Dissertação (Mestrado), Departamento de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto.

Wolff, A, P; Costa, G, M; Dutra, F,C. **A Comparative study of ultra-fine iron ore tailings from Brazil**. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review: An International Journal, v, 32, p. 47 – 59, 2011.

Woiler, S; Mathias, W, F. **Projetos: planejamento, elaboração e análise**. São Paulo: Atlas, 1996.

Yao, R; Liao, S, Y; Dai, C; Liu, Y; Chen, X; Zheng, F. **Preparation and characterization of novel glass–ceramic tile with microwave absorption properties from iron ore tailings**. Journal of Magnetism and Magnetic Material, v. 378. 367-365 p. 2014.

Yellishetty, M; Karpe, V; Reddy, E, H; Subhash, K, N; Ranjith, P,G. **Reuse of iron ore mineral wastes in civil engineering constructions: a case study**. Resources, Conservation and Recycling, v. 52, p. 1283-1289, 2008.

Zhang, T; Chu, J; Wang, X; Liu, X; Cui, P. **Development pattern and enhancing system of automotive components remanufacturing industry in China.** Resources, Conservation and Recycling.v. 55, p. 613-622, 2011.