

SIMULAÇÃO DE UMA OPERAÇÃO DE EMPILHAMENTO DE REJEITOS A SECO

Frederico Teixeira Villela Araújo, fred_villela@hotmail.com

Orientadora: Sílvia Maria Santana Mapa, silvia.mapa@ifmg.edu.br

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia – Minas Gerais, Campus Congonhas

Resumo:

Este trabalho aborda a otimização do processo de empilhamento de rejeitos de mineração de ferro, uma alternativa crescente ao uso de barragens. O objetivo da pesquisa é desenvolver um modelo de simulação, utilizando o software Arena®, que permita identificar gargalos e avaliar cenários para otimizar a operação de empilhamento de rejeitos filtrados. Dados reais de telemetria e taxas de produção de equipamentos foram obtidos de uma mineradora situada no Quadrilátero Ferrífero, em Minas Gerais, Brasil. Os resultados da simulação de um cenário-base identificaram a secagem como o principal gargalo, sendo a maior responsável pelo tempo total do ciclo de alteamento de camadas. As simulações de diferentes cenários otimizando a taxa média de secagem diária resultaram em uma redução significativa no tempo de alteamento de uma camada e consequente aumento da produtividade. O modelo mostrou-se coerente com a dinâmica do processo, especialmente em relação à sazonalidade da produção, impactada pela ocorrência de chuvas, apresentando-se como uma ferramenta viável para o planejamento operacional.

Palavras-chave: *Simulação de eventos discretos, Rejeito de mineração, Empilhamento a seco, Empilhamento de rejeito.*

Abstract: *This study addresses the optimization of the iron ore tailings stacking process, an increasing alternative to the use of dams. The objective of the research is to develop a simulation model using Arena® software to identify bottlenecks and evaluate scenarios to optimize the operation of stacking filtered tailings. Real telemetry data and equipment production rates were obtained from a mining company located in the Quadrilátero Ferrífero region in Minas Gerais, Brazil. The simulation results of a baseline scenario identified drying as the main bottleneck, responsible for the majority of the total layer elevation cycle time. Simulations of different scenarios optimizing the average daily drying rate resulted in a significant reduction in the layer elevation time and consequent increase in productivity. The model proved to be consistent with the dynamics, especially regarding the seasonality of production, which is impacted by rainfall, and demonstrated its viability as a tool for operational planning.*

Keywords: *Discrete event simulation, Mining tailing, Dry stacking, Tailing stacking.*

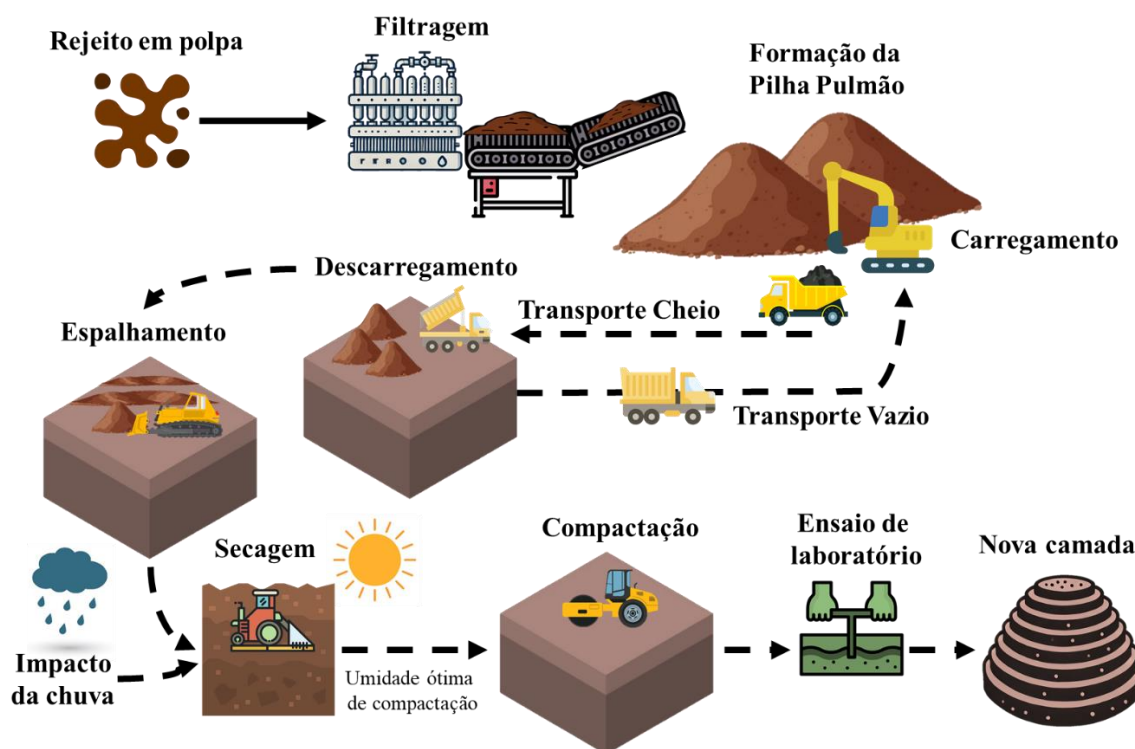
1. INTRODUÇÃO

Em razão dos recentes desastres decorrentes da prática de armazenar rejeitos de minério de ferro em barragens e à promulgação de regulamentações tanto a nível estadual quanto federal que exigem a desativação destas estruturas alteadas a montante (Resolução Conjunta SEMAD/FEAM nº 2.784 e a Resolução da Agência Nacional de Mineração-ANM nº 13), tornou-se imperativo encontrar alternativas para encerrar a operação destas estruturas e buscar novas abordagens para disposição final do rejeito de mineração, como, por exemplo, o empilhamento de rejeito filtrado a seco.

A implementação da tecnologia de empilhamento de rejeitos a seco em operações de mineração oferece várias vantagens, como a eliminação dos riscos associados a falhas catastróficas de barragens. Além disso, a operação de empilhamento a seco permite a disposição em elevações mais altas e a reabilitação progressiva do meio, mitigando a perturbação ambiental geral e distribuindo os custos ao longo da vida útil da mina (Dimitriadis; Zachareas; Gazea, 2022).

Para que as pilhas de rejeito cresçam e apresentem condições de estabilidade em sua geometria final, é necessário que o processo de empilhamento seja feito de maneira controlada, ou seja, que a cada camada de aterro haja compactação em condições de umidade onde se obtenha uma maior densidade, aumentando a resistência ao cisalhamento e ao risco de falhas estruturais (AECOM; MPMG, 2024). Nesse sentido, a operação de empilhamento consiste em um ciclo de alteamento de camadas em uma pilha, o qual se inicia após a filtragem do rejeito, proveniente da usina de beneficiamento de minério, e se desenvolve nas etapas subsequentes de transporte, espalhamento, redução de umidade e, por fim, a compactação como ilustrado pela Figura 1.

Figura 1 – Ciclo de empilhamento de uma nova camada na operação de empilhamento a seco (Fonte: Autor).



O prolongamento do tempo necessário para se completar este ciclo de empilhamento impacta significativamente na eficiência das operações de manejo de rejeito, aumentando os custos e a utilização de recursos, sendo seu principal risco ocasionar uma parada operacional de toda a produção de uma mineradora. As operações de beneficiamento do minério nas usinas operam continuamente, conseqüentemente a produção de rejeitos também é constante. Desta maneira, para evitar interrupções na operação em toda a cadeia, é essencial que a capacidade volumétrica de empilhamento seja igual ou superior à produção de rejeitos gerados pela filtragem. Portanto, é peremptória a necessidade de estudos em busca as melhores práticas e meio de otimização da operação.

Frete a isso, a utilização de simulação na indústria de mineração tem se mostrado uma ferramenta essencial para otimizar operações buscando evitar interrupções na produção. Através da modelagem de processos complexos, como o fluxo de materiais e o funcionamento dos equipamentos, a simulação computacional fornece uma análise detalhada do sistema, identificando gargalos e oportunidades de melhoria. Além disso, a simulação auxilia no dimensionamento adequado da frota de equipamentos, garantindo que estes estejam alinhados com a capacidade de produção e as restrições do processo.

Softwares de simulação como o Arena®, têm sido amplamente adotados para esse fim, oferecendo recursos avançados de modelagem e análise que possibilitam uma tomada de decisão mais precisa e eficaz pelos gestores de atividades operacionais. Ao prever cenários e simular diferentes estratégias de produção, essas ferramentas contribuem significativamente para a redução de custos, aumento da eficiência operacional e minimização de paradas não planejadas (Torres *et al.*, 2020). Ao modelar a variabilidade das disponibilidades de equipamentos e mão de obra, esses

modelos fornecem *insights* valiosos sobre as relações entre os recursos disponíveis, impactos de condições externas e a eficiência da operação, contribuindo para a melhoria contínua em unidades de mineradoras (Mathey, 2022).

Diante deste contexto, este trabalho busca avaliar por meio de um modelo de simulação, uma operação de empilhamento de rejeito de uma mineradora, localizada no Quadrilátero Ferrífero no estado de Minas Gerais, Brasil. O estudo busca entender os principais gargalos e avaliar por meio de cenários distintos os impactos que melhorias de processo ocasionam sobre a eficiência operacional. O estudo proposto nesse trabalho aplica a técnica Simulação de Eventos Discretos (SED) para modelar o processo de empilhamento de rejeito a seco, incorporando a sazonalidade desse processo, uma vez que em períodos chuvosos o tempo de secagem ao ar livre é mais longo em relação aos períodos secos, e tem alto impacto no processo.

2. OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho é simular a operação de empilhamento de rejeitos na mineração utilizando o software Arena®, com o intuito de analisar e otimizar os processos envolvidos. Busca-se identificar o cenário ideal em que a capacidade operacional de empilhamento seja sustentável, de modo a absorver toda a produção de rejeitos da mineradora em questão.

Para tal inicialmente será realizado o mapeamento do processo atual, identificando todas as etapas e os recursos envolvidos na operação de empilhamento de rejeito. Com base nesse levantamento, será elaborado o fluxo do modelo. Em relação aos parâmetros de entrada, serão coletados dados como produção, capacidade dos equipamentos, taxas operacionais, entre outros aspectos relevantes. Em sequência, será desenvolvido um modelo de simulação representativo do processo de empilhamento de rejeito utilizando o software Arena®. Este modelo será validado com base nos dados reais coletados para garantir a fidelidade do modelo ao processo estudado. Após a validação do modelo, será realizada uma análise da eficiência operacional, simulando o processo atual para identificar gargalos e ineficiências, medindo indicadores de desempenho como volume de rejeito empilhado, tempo total de operação, taxa de utilização de equipamentos e custos operacionais.

Posteriormente, serão explorados diferentes cenários de otimização, testando mudanças na alocação de recursos, ajustes nos tempos de ciclo e a introdução de novas tecnologias, analisando o impacto dessas mudanças na eficiência e nos custos. Por fim, serão propostas melhorias no processo, identificando as melhores práticas e estratégias para otimizar a operação de empilhamento de rejeito, fornecendo recomendações baseadas nos resultados da simulação para implementação prática.

3. REVISÃO DE LITERATURA

Esta seção apresenta os estudos mais recentes envolvendo o processo de desidratação do rejeito de minério, como soluções para substituir as barragens de rejeito por pilhas de rejeito.

Um estudo desenvolvido na mina de Pau Branco, localizada no Quadrilátero Ferrífero no Brasil, avaliou um sistema de desaguamento para os rejeitos de minério de ferro. Embora o empilhamento a seco seja uma alternativa mais segura em comparação com barragens tradicionais, a viabilidade técnica e econômica desse método enfrenta obstáculos, como a necessidade de garantir que os rejeitos atinjam um teor de umidade apropriado para evitar riscos de deslizamentos (Gomes; De Tomi; Assis, 2016). O estudo mostra que o sistema desenvolvido, que inclui triagem de alta frequência e prensa de filtro horizontal, consegue reduzir a umidade para 15%, o que é adequado para o empilhamento a seco. No entanto, a pesquisa também ressalta que a implementação bem-sucedida requer investimentos significativos e uma mudança na abordagem operacional, considerando os custos de manutenção e os desafios de monitoramento e controle dos rejeitos empilhados. Apesar disso, a solução proposta oferece vantagens econômicas, ambientais e sociais, sugerindo que a adoção do empilhamento a seco pode ser um passo positivo para melhorar a sustentabilidade da mineração na região.

O processo de empilhamento a seco se inicia na filtragem de rejeitos, processo em que ocorre a separação do sólido da fase líquida através de um meio poroso, geralmente um filtro prensa ou uma prensa de filtro de banda. Essa separação resulta na formação de um bolo de filtro sólido e uma água filtrada clarificada. Os teores de umidade alcançáveis para os bolos de filtro geralmente são maiores do que o projetado e variam de 17 a 18% de umidade de processo durante a operação normal, e até 20 a 23% quando fora da especificação (Crystal; Hore; Ezama, 2018).

Os rejeitos filtrados são transportados por correia ou caminhão e, depois, espalhados e compactados para formar uma pilha densa, estável e não saturada, conhecida como "pilha seca". Embora o termo "seco" seja utilizado, os rejeitos filtrados não estão totalmente secos, mas sim insaturados e a compactação dos rejeitos é um aspecto importante para garantir a estabilidade da pilha (Davies, 2011).

Para a compactação de uma nova camada, normalmente busca-se atingir a umidade ótima do material, a qual pode ser definida como o teor de umidade no qual um solo pode ser compactado à sua densidade máxima, usando uma energia de compactação específica. A densidade máxima seca é obtida quando o solo tem quantidade suficiente de água para permitir a rearrumação das partículas, mas não tanto a ponto de começar a separar as partículas. Isto posto, observa-se que a umidade do rejeito produzido em processos de filtragem é, em diversos casos, significativamente superior a umidade ótima desse material, demandando que após o material ser disposto nas regiões de empilhamento, este passe por um processo de secagem e, em sucessão, a nova camada seja compactada e liberada (Holtz; Kovacs; Thomas C. Sheahan, 1981).

O uso de simulação na mineração é amplamente consolidado e tem se mostrado uma ferramenta valiosa para a avaliação e otimização de operações. A simulação permite a análise detalhada de diferentes cenários operacionais, proporcionando dados cruciais para o dimensionamento adequado da frota e a melhoria contínua dos processos. Através da simulação de eventos discretos, é possível simular o comportamento das operações de empilhamento de rejeito,

considerando variáveis complexas como a capacidade de carga dos caminhões e a eficiência dos equipamentos. Essa abordagem não apenas facilita a comparação entre alternativas tecnológicas, mas também permite a identificação de estratégias que maximizam a produtividade e reduzem os custos operacionais. A capacidade de testar e avaliar diferentes configurações e condições operacionais em um ambiente virtual é essencial para a tomada de decisões e para a implementação de melhorias eficazes no gerenciamento de rejeitos (Dendle; Isokangas; Corry, 2022).

Uma pesquisa apresenta um modelo de simulação de eventos discretos aplicado ao planejamento do desenvolvimento da nova mina, com o objetivo de prever as taxas de desenvolvimento reais. Utilizando o software Arena®, o modelo incorpora equipamentos principais e o progresso do ciclo de mineração, baseando-se em dados coletados previamente e em um sistema de turnos de 10 horas. Foram realizadas 1.000 simulações para prever o desenvolvimento nos primeiros seis anos, revelando que as taxas de construção planejadas podem não ser viáveis com as práticas operacionais atuais. A pesquisa sugere que mudanças estratégicas nas práticas de manutenção, na disponibilidade de *orepasses* e na sequência de planejamento podem resultar em melhorias significativas. Os resultados indicam uma maior precisão nas previsões à medida que o número de simulações aumenta, ressaltando a importância da simulação como ferramenta para otimizar o desempenho da mina (Soto; Anani; Córdova, 2022).

Rodvalho (2013), buscou aprimorar a qualidade dos planos de lavra de curto prazo, utilizando técnicas de simulação e regressões lineares múltiplas para estimar índices de produtividade horária das operações. A metodologia envolve análise estatística com o software MINITAB 16®, simulação com o Arena® para modelar variáveis do sistema produtivo e validação através da comparação de resultados simulados com dados reais. Os resultados demonstraram a eficácia da simulação na representação do comportamento das variáveis, com boa aderência entre os dados estimados e reais, o que aumentou a precisão dos planos de lavra. Além disso, a pesquisa enfatiza a importância das ferramentas de simulação na otimização das operações de mineração e que as técnicas utilizadas são eficazes na estimativa de indicadores de desempenho, melhorando a confiabilidade e a exequibilidade dos planos de lavra.

A partir de um estudo de caso, foi possível identificar problemas no fluxo logístico de uma empresa de segurança e comunicação, como filas e altos tempos de processamento, e propor soluções baseadas no balanceamento de estações de trabalho e na reformulação do layout, utilizando o software Arena®. As mudanças implementadas reduziram em 28% o tempo de processamento e trouxeram melhorias ergonômicas e nas condições de trabalho. A simulação se mostrou fundamental para identificar gargalos e otimizar processos, evidenciando sua relevância na eficiência e redução de custos (Oliveira *et al.*, 2022). Nesse contexto, este trabalho realizou uma simulação detalhada do processo de empilhamento de rejeitos de minério de ferro utilizando o software Arena®, com foco nos fatores que impactam diretamente essa operação. Diferentemente de estudos voltados para planos de lavra e sistemas de despacho, este estudo concentrou-se na análise de cenários operacionais, coletando dados sobre produção, capacidade dos equipamentos e taxas operacionais para construir um modelo representativo. Além disso, foram avaliados os impactos de fatores externos, como chuvas e falhas de equipamentos, permitindo uma análise mais ampla das condições que afetam a eficiência do empilhamento.

4. MÉTODOS E MATERIAIS

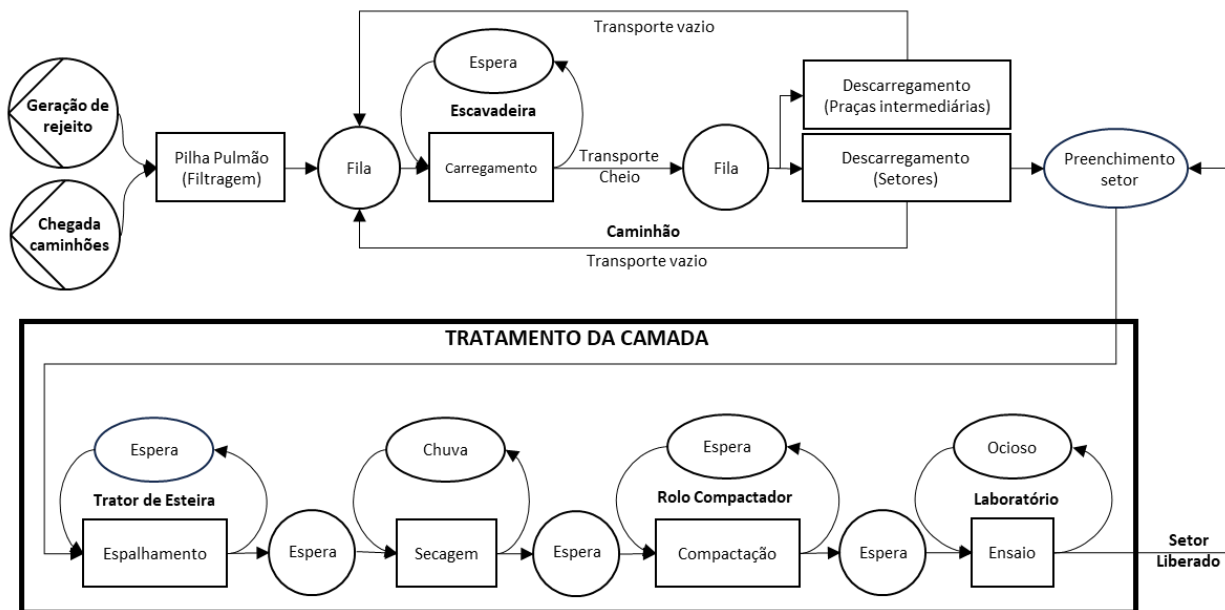
Nesta seção, são descritos os procedimentos adotados para a construção do modelo de simulação do processo de empilhamento de rejeitos filtrados. O trabalho incluiu a coleta de dados operacionais e o mapeamento detalhado dos processos associados a essa operação em uma mineradora localizada no Quadrilátero Ferrífero, em Minas Gerais. Em seguida, são apresentadas as etapas de tratamento dos dados, a configuração do modelo e a definição das variáveis utilizadas na construção do cenário-base para a simulação no software Arena®.

4.1. Mapeamento do processo

O software Arena®, desenvolvido pela Rockwell Automation, é uma ferramenta avançada amplamente utilizada para simulação de eventos discretos em diversas indústrias, incluindo mineração, manufatura e logística. Ele oferece uma interface gráfica robusta e baseia-se no sistema SIMAN/CINEMA, proporcionando uma ampla variedade de módulos e *templates* para modelagem de processos complexos de sistemas reais.

A metodologia adotada neste estudo envolve a simulação detalhada da operação de manejo e empilhamento a seco de rejeitos de minério de ferro, utilizando o software Arena®. Para modelar conceitualmente o fluxo do processo, foi empregada a ferramenta “*Activity Cycle Diagrams*” (ACD – Diagrama de Ciclo de Atividades), conforme apresentado na Figura 2. Como destacado por Pereira *et al.* (2023), os diagramas ACD são uma ferramenta eficaz para a compreensão aprofundada do comportamento de sistemas reais, o que contribui para a modelagem e simulação de eventos discretos, facilitando não apenas a estruturação da operação, mas também promovendo uma compreensão clara dos elementos fundamentais da simulação.

Figura 2- Diagrama ACD do Empilhamento de Rejeitos.



O ciclo de empilhamento de uma nova camada inicia-se na planta de filtração, local onde o rejeito é submetido a processos de filtração sob elevadas pressões, promovendo a separação do material sólido e da água. O rejeito, ainda com um teor de umidade superior ao ideal para compactação, é transportado por correias transportadoras até uma pilha pulmão. Tal como apresentado pelo diagrama ACD (Figura 2), após a filtração os caminhões destinam-se a pilha pulmão para realizar o carregamento por meio de escavadeiras.

Para a formação de uma pilha de rejeito, a área de disposição é subdividida em setores que permitem um melhor controle de qualidade de novas camadas. Desta maneira, após o carregamento os caminhões, priorizam-se o transporte para o setor disponível com a menor distância média de transporte (DMT). Portanto, os caminhões carregados de rejeito se destinam para o setor onde uma nova camada da pilha está sendo formada. No cenário em que todos os setores estejam indisponíveis, o material é encaminhado para praças intermediárias, locais onde o rejeito é temporariamente estocado para a posterior retomada e destinação ao empilhamento em camadas. Essas desempenham um papel crucial na garantia da continuidade operacional, uma vez que a interrupção da filtração implica em uma paralisação de toda a cadeia dos processos precedentes, resultando na paralisação completa da produção da mineradora.

Seguindo o processo, após preenchimento do setor com o volume de material necessário para o alteamento de uma nova camada, inicia-se o processo de espalhamento do material por toda a área do setor designado, o qual é realizado por meio de trator de esteira. Em sequência, o material passa pela etapa de secagem, na qual a umidade é monitorada diariamente. Quando o teor de umidade atinge aproximadamente 15%, inicia-se o processo de compactação utilizando um rolo compactador. Com a camada compactada, uma equipe do laboratório de controle tecnológico é acionada para coletar amostras em campo, a fim de aferir o grau de compactação e verificar o desvio em relação à umidade ótima. Caso os resultados sejam aprovados, a camada é liberada para um novo alteamento, do contrário, a camada passa por reabertura para continuar o processo de secagem e subsequente compactação.

4.2. Coleta de dados

Para simular cada fase da operação, é necessário utilizar dados que se aproximem das taxas e tempos reais necessários para a conclusão de cada atividade. Para tal, os dados operacionais referentes aos caminhões foram obtidos por meio de um sistema de telemetria da mina, que utiliza o *software* EasyMine. Este sistema de telemetria fornece informações detalhadas e em tempo real sobre a operação dos equipamentos de transporte, incluindo velocidade média, tempos de carregamento, manobra e basculamento.

A disposição de rejeitos é realizada na área delimitada pelo licenciamento ambiental para implantação das pilhas de rejeito, a qual é setorizada em diferentes praças destinadas à disposição. Foi realizado um levantamento detalhado das áreas e distâncias de cada setor, já que possuem diferentes geometrias e distâncias em relação à praça da filtração onde é produzido o rejeito, possibilitando calcular o tempo de transporte com base nos dados de velocidade dos caminhões.

Para os equipamentos de infraestrutura, como o trator de e o rolo compactador, foram empregadas as taxas aproximadas observadas em campo. Esses dados foram integrados ao modelo de simulação para representar as capacidades de produção desses equipamentos e obter as estimativas de tempo das operações de espalhamento do material e compactação.

A secagem do rejeito é a etapa que demanda mais tempo dentro do ciclo de empilhamento e este processo é diretamente dependente das condições meteorológicas. Esse processo é otimizado por meio do uso de tratores agrícolas que realizam a aração da camada, aumentando a área superficial exposta e trazendo os materiais ainda úmidos para a superfície. No modelo, foi utilizada a taxa média de perda diária de umidade em dias sem chuva, que foi obtida com base em um histórico de ensaios diários de umidade realizados pelo laboratório de controle tecnológico.

O modelo de simulação foi então implementado no *software* Arena®, versão 16.20, configurando-se o esquema operacional e definindo-se a lógica do problema com base nos dados coletados. Essa abordagem metodológica

proporciona uma base sólida para a análise e otimização das operações de manejo e empilhamento de rejeito de minério de ferro, visando melhorias significativas na eficiência e na sustentabilidade operacional.

4.3. Experimentos computacionais

4.3.1. Input Analyser

O Input Analyser é uma ferramenta do software Arena® que permite analisar os dados e obter parâmetros para serem utilizados no modelo de simulação. Esta ferramenta possibilita a compilação de informações resumidas sobre os dados, resultados estatísticos do teste de aderência, gráfico da distribuição de melhor ajuste sobreposto a um histograma, além de expressões e parâmetros da distribuição de melhor ajuste (Agyei; Kateng, 2023). Nesse sentido, por meio das bases de dados levantadas sobre os equipamentos e processos, foram obtidos os parâmetros e expressões como dados de entrada dos módulos do Arena®, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Análises Estatísticas dos Processos.

Processo	Unidade	Expressão
Manobra	Horas	LOGN(0.0166, 0.00738)
Carregamento	Horas	LOGN(0.0351, 0.0128)
Descarga	Horas	LOGN(0.0232, 0.0115)
Velocidade Cheio	km/h	NORM(12.7, 3.82)
Velocidade Vazio	km/h	9 + 12 * BETA(1.35, 1.33)
Umidade	%	13 + 14 * BETA(8.4, 8.61)

4.3.2. Módulos do Arena®



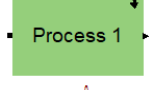
Para elaboração de todo o fluxo da operação, implementação das lógicas e dados do processo, foram utilizados os módulos de dados e de fluxograma existentes no *software*.


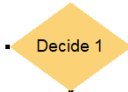

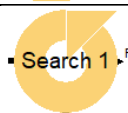
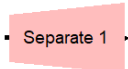

Os módulos de dados, presentes nas planilhas do modelo, definem as características e valores dos elementos do processo. Os principais módulos utilizados para modelar o fluxo de empilhamento foram:

- **Entity:** Elementos que são processados ou movimentados dentro do modelo de simulação. Pode representar diversos elementos, como clientes, equipamentos, documentos, peças de produção, ou pacotes de dados. As entidades podem apresentar diferentes elementos em um mesmo modelo.
- **Attribute:** São informações e características específicas de cada entidade e podem ser usadas e atualizadas em diferentes módulos.
- **Resource:** São componentes que representam os recursos necessários para executar processos na simulação, como máquinas, trabalhadores ou equipamentos. O módulo de dados de recursos define suas capacidades, custos e disponibilidade, e pode configurar falhas e estados operacionais. Ele é essencial para modelar como e quando os recursos estão disponíveis e como são alocados durante a simulação.
- **Variable:** São elementos que armazenam valores que podem ser usados em diferentes partes do modelo, como em cálculos e decisões. O módulo define suas dimensões e valores iniciais, podendo também ser utilizado para alterar valores durante a simulação.
- **Failure:** Módulos de gerenciamento de falhas e interrupções em recursos.

O painel de Processamento contém os módulos de fluxograma utilizados para a modelagem da operação de empilhamento de rejeito, conforme detalhado na Quadro 1.

Quadro 1 -Descrição das funcionalidades dos módulos de fluxograma (AUTOMATION, 2022).

Módulos	Funcionalidades
	Ponto inicial para a criação de entidades em um modelo de simulação. As entidades podem ser geradas de acordo com uma programação ou com base no intervalo de tempo entre chegadas.
	Atribui novos valores a variáveis, atributos de entidades, tipos de entidades, imagens de entidades ou outras variáveis do sistema.
	Este módulo executa o processamento principal da simulação, permitindo capturar e liberar recursos, além de definir submodelos com lógicas personalizadas. Ele registra o tempo e custos das entidades e exibe animações do processo e das filas quando necessário.

	O módulo <i>Delay</i> atrasa uma entidade por um tempo calculado, classificando esse período e podendo atribuir os custos correspondentes ao processo.
	Utilizado para tomada de decisões na simulação, com base em condições ou probabilidades, e define múltiplos caminhos de saída para as entidades.
	Mantém entidades em espera por um sinal, uma condição ou indefinidamente.
	Busca em filas, grupos ou expressões para encontrar entidades ou valores que atendam a uma condição especificada. O valor da variável global J é atualizado durante a busca, e a busca termina quando a condição é satisfeita ou o limite é alcançado. Caso não haja entidades ou a condição não seja atendida, J é definido como 0.
	Atribui novos valores a variáveis, atributos de entidades, tipos de entidades, imagens de entidades ou outras variáveis do sistema.
	Destino final para as entidades em um modelo de simulação. Antes de serem removidas, é possível registrar estatísticas sobre as entidades.

4.3.3. Fluxograma

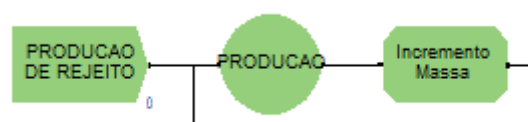
O fluxo desta operação pode ser dividido em três macroprocessos, sendo estes:

- Geração e carregamento de rejeito;
- Ciclo de transporte;
- Tratamento da camada.

4.3.3.1. Geração e carregamento de rejeito

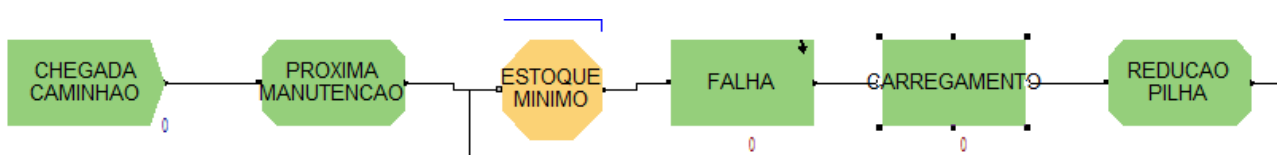
Precedentemente ao início do fluxograma principal da operação, foi necessário elaborar um subprocesso para gerenciar o volume de rejeito produzido no modelo, conforme apresentado na Figura 3. Portanto, neste subprocesso é simulado a produção de rejeito, no qual ocorre em bateladas em uma planta de filtragem. Para isso, através de um módulo *Create* é gerada uma única entidade que, por meio de um módulo *Delay*, a cada 20 minutos percorre este ciclo. Uma variável denominada “massa_rejeito” é responsável por controlar a massa em estoque na pilha pulmão da Filtragem e durante o ciclo é processada por um módulo *Assign* chamado “INCREMENTO MASSA”, que atualiza seu valor incrementando 320 toneladas de rejeito ao seu valor.

Figura 3 – Ciclo de geração de rejeito.



O fluxograma principal se inicia com uma geração única de entidades que neste primeiro estágio representam os caminhões responsáveis pelo transporte de rejeito para os setores das pilhas, conforme mostrado na Figura 4. Após a geração das entidades, estas irão entrar no ciclo operacional de viagens dos caminhões, iniciando-se pelo carregamento. Assim, após uma entidade passar pelo processo de CARREGAMENTO, em sequência ela é processada por um módulo *Assign*, que manipula variável “massa_rejeito” debitando o valor carregado pelo caminhão. Para garantir que a pilha pulmão possua uma massa mínima para o carregamento de um caminhão, o qual representa um valor de 60 toneladas, foi implantado um módulo *Hold* que estipula essa condicional garantindo que as entidades (caminhões) permaneçam em espera caso esta condição não esteja satisfeita.

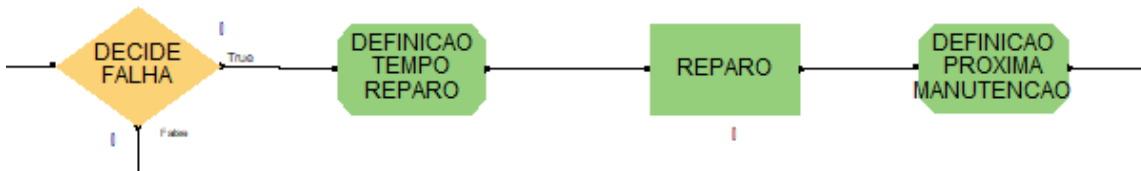
Figura 4 – Processo de carregamento e das lógicas de manutenção dos caminhões.



Neste início do fluxograma foram definidas as lógicas de manutenção dos caminhões. Para isso, foram utilizados os valores históricos médios dos indicadores MTBF (*Mean Time Between Failures* - Tempo Médio Entre

Falhas de um equipamento) e MTTR (*Mean Time To Repair* - Tempo Médio Necessário para Reparar um equipamento após uma falha). Por meio de uma variável é definido quando será a próxima falha através de uma distribuição estatística exponencial com média o valor do MTBF. O processo denominado de FALHA é um submodelo apresentado pela Figura 5, no qual é feita a verificação se o tempo de execução do modelo já atingiu o tempo determinado da próxima falha. Quando é determinada a falha no equipamento, esta entidade entra em um módulo de *Hold*, onde permanece em espera simulando o reparo do caminhão durante um tempo, também determinado por uma distribuição exponencial com sua média sendo o MTTR. Em sequência, um módulo *Assign* define a próxima ocorrência de falha.

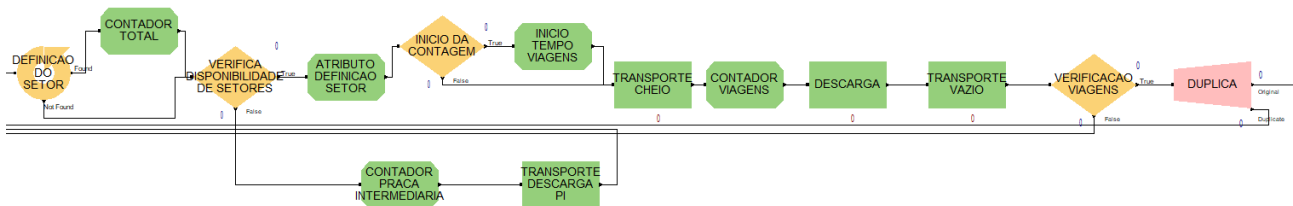
Figura 5 – Submodelo de definição de falhas dos caminhões.



4.3.3.2. Ciclo de transporte

Após a etapa de carregamento, um módulo *Search* é responsável por verificar para qual setor a entidade será direcionada. Para isso, inicialmente foram criadas duas variáveis em formato de vetores, responsáveis por armazenar dados referentes às DMT e os status de disponibilidade, ou seja, se o setor se encontra em processo de alteamento de uma nova camada ou se encontra disponível para recebimento de material. Cada linha destes vetores representa os dados de um setor diferente da pilha. Desta maneira, o módulo verifica campo a campo dos vetores a condição de qual o setor possui menor DMT, e se encontra com o status disponível. A partir da definição do número do setor a qual a entidade será destinada, esta informação é logo armazenada em um atributo denominado “A_camada”. No cenário em que nenhum dos setores estejam com o status disponível, um módulo *Decide* encaminha as entidades para as praças intermediárias.

Figura 6 – Ciclo operacional dos caminhões.



Após a definição do setor, a entidade percorre os processos de transporte, descarga e deslocamento para um novo carregamento. Para gerenciar o número de caminhões alocados a cada setor, foi criada uma variável em formato de vetor, que contém a capacidade máxima de viagens suportada por cada setor, denominada “viagens_max”, e um outro vetor de controle que monitora o número de viagens de cada setor sempre que um novo setor é definido como destino das entidades, denominado “contador_viagens”. Assim, por meio do módulo *Decide*, verifica-se se a variável de controle atingiu ou superou a capacidade de viagens do respectivo setor. Caso não esteja atingido o valor limite, a entidade retorna ao início do ciclo para um novo carregamento. Portanto, quando os valores das variáveis *viagem_max* e *contador_viagem* se igualam para aquele setor que está sendo carregado, representando que ele recebeu o volume de material necessário para o preenchimento de uma nova camada, a condição do módulo é satisfeita, e a entidade é enviada para o módulo *Separate*, onde é duplicada. Uma cópia representa o caminhão e retorna ao início do ciclo para um novo carregamento, enquanto a outra representa a camada que será processada e segue no fluxograma.

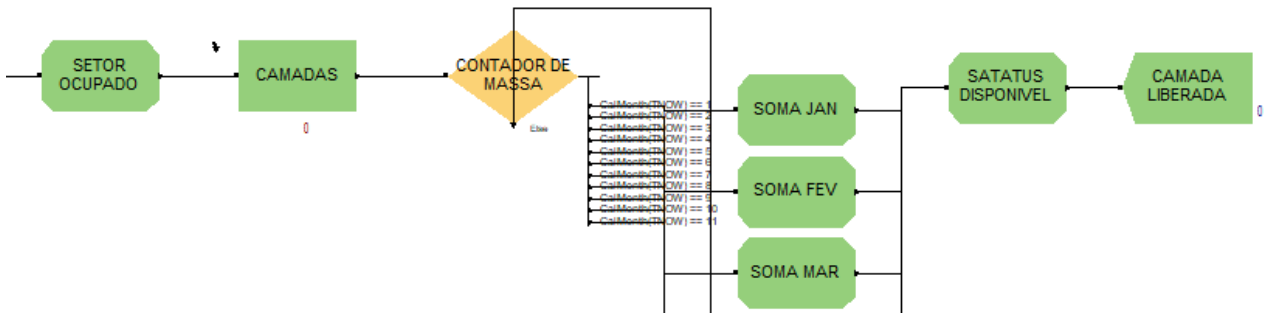
Após a definição do setor, a entidade percorre os processos de transporte, descarga e deslocamento para um novo carregamento. Para gerenciar o número de caminhões alocados a cada setor, foi criada uma variável em formato de vetor chamada “viagens_max”, que armazena a capacidade máxima de viagens permitida para cada setor. Paralelamente, um vetor de controle, denominado “contador_viagens”, monitora o número de viagens realizadas por setor. O módulo *Decide* verifica se o valor de *contador_viagens* atingiu ou superou o limite estabelecido por *viagens_max*, caso o limite não tenha sido alcançado, a entidade retorna ao início do ciclo para um novo carregamento. Quando os valores de “viagens_max” e “contador_viagens” se igualam, indicando que o setor recebeu o volume necessário para formar uma nova camada, a condição do módulo é satisfeita. Nesse momento, a entidade é direcionada ao módulo *Separate*, onde é duplicada: uma cópia retorna ao início do ciclo representando o caminhão, enquanto a outra representa a camada formada e segue no fluxograma para processamento.

Ademais, foram criadas variáveis de monitoramento de dados do processo, como o número de viagens e o tempo de preenchimento médio de cada setor.

4.3.3.3. Tratamento da camada

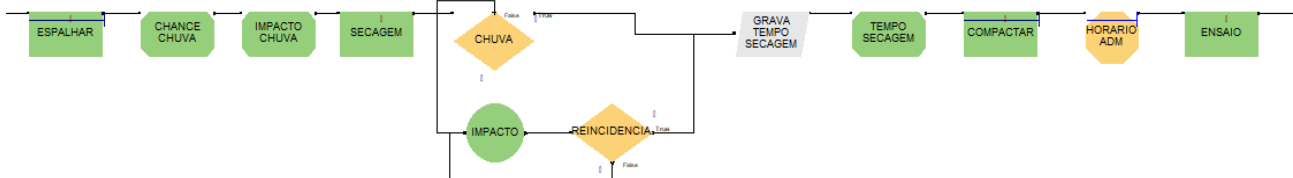
Quando uma nova camada é preenchida com o número máximo de viagens que suporta, seu status é alterado para indisponível, e a variável que armazena o número de viagens recebidas para esse setor é reiniciada. A entidade gerada, representando a camada, é então direcionada a um submodelo onde ocorre todo o processo de tratamento da camada, conforme apresentado na Figura 7.

Figura 7 – Tratamento da camada.



Neste submodelo representado pela Figura 8, ocorre o processo de espalhamento da camada, para o qual são alocados como recursos os tratores de esteira responsáveis pela atividade. A lógica de manutenção desses tratores foi definida por meio do módulo de dados *Failure*, utilizando os indicadores MTBF e MTTR.

Figura 8 – Submodelo dos processos de tratamento da camada por setor.



Para simular o impacto da chuva na etapa de tratamento da camada, foram gerados três vetores com 12 linhas, cada uma representando um mês do ano probabilístico. Para isso, foram utilizados dados históricos coletados de uma estação meteorológica localizada na planta da mineradora. O primeiro vetor refere-se à probabilidade de ocorrência de um dia de chuva em um intervalo de cinco dias, orientando o primeiro módulo *Decide* chamado de “CHUVA”. Em um cenário ocorrência de evento de chuva, um módulo *Delay* quantifica o impacto da chuva sobre a secagem com base em um segundo vetor, que discretiza as probabilidades de diferentes intensidades de chuva para cada mês. Por fim, um terceiro vetor é utilizado por um módulo *Decide* para avaliar a probabilidade de ocorrência de dois ou mais dias de chuva em um intervalo de cinco dias, simulando a recorrência de eventos de chuva durante o tratamento de uma mesma camada.

O tempo de todo este processo de secagem é armazenado em um arquivo de texto por meio do módulo *ReadWrite*. As probabilidades consideradas para os eventos de chuva estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Probabilidades de ocorrência de chuva e nível de intensidade

Meses	Evento de chuva		Intensidade				Duas ou mais ocorrências	
	Chover	Não chover	5mm - 10mm	10mm - 15mm	15mm - 20mm	20mm - 60mm	Chover	Não Chover
Jan	0.520	0.480	0.361	0.520	0.056	0.063	0.660	0.340
Fev	0.290	0.710	0.182	0.382	0.391	0.045	0.430	0.570
Mar	0.110	0.890	0.625	0.000	0.083	0.292	0.300	0.700
Abr	0.220	0.780	0.425	0.250	0.000	0.325	0.150	0.850
Mai	0.050	0.950	0.667	0.333	0.000	0.000	0.000	1.000
Jun	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000
Jul	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000
Ago	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000
Set	0.100	0.900	0.750	0.250	0.000	0.000	0.067	0.933
Out	0.240	0.760	0.437	0.325	0.056	0.183	0.290	0.710

Nov	0.320	0.680	0.417	0.250	0.250	0.083	0.300	0.700
Dez	0.370	0.630	0.365	0.310	0.143	0.183	0.420	0.580

Foi estabelecido que chuvas de 5mm a 10mm impactam no tempo de secagem com adição de dois dias, 10mm a 15mm em três dias, 15mm a 20mm em quatro dias e para chuvas superiores a 20mm em cinco dias. Com base nessas premissas e dados, foram criadas as funções de probabilidade apresentadas na Tabela 3, representadas por uma distribuição de probabilidade discreta (DISC). O primeiro número após a abertura de parênteses é a probabilidade de ocorrência do número após a vírgula. Por exemplo, na linha referente ao mês de janeiro, a distribuição de probabilidade da ocorrência de chuva é representada pelo termo “DISC(0.48,0,1,1)”. Assim, a probabilidade para não chover é de 48%, e a de chover é 52%. Para a distribuição de probabilidade da intensidade da chuva a função representa a probabilidade de cada faixa de intensidade seguido de seu respectivo impacto sobre o processo de secagem. Para o mês de janeiro o termo “DISC(0.36,2,0.88,3,0.94,4,1,5)”, inicia com a probabilidade de 36% de uma chuva de 5mm a 10mm, seguido da probabilidade de 52% de uma chuva de 10mm a 15mm com impacto de 3 dias e assim semelhante para as outras instâncias.

Tabela 3 – Funções de distribuição estatística discreta para chuva.

Meses	Ocorrência	Intensidade
Jan	DISC(0.48,0,1,1)	DISC(0.36,2,0.88,3,0.94,4,1,5)
Fev	DISC(0.71,0,1,1)	DISC(0.18,2,0.56,3,0.95,4,1,5)
Mar	DISC(0.89,0,1,1)	DISC(0.625,2,0.71,4,1,5)
Abr	DISC(0.78,0,1,1)	DISC(0.425,2,0.675,3,1,5)
Mai	DISC(0.95,0,1,1)	DISC(0.67,2,1,3)
Jun	DISC(1,0)	DISC(1,0)
Jul	DISC(1,0)	DISC(1,0)
Ago	DISC(1,0)	DISC(1,0)
Set	DISC(0.9,0,1,1)	DISC(0.75,2,1,3)
Out	DISC(0.76,0,1,1)	DISC(0.43,2,0.76,3,0.81,4,1,5)
Nov	DISC(0.68,0,1,1)	DISC(0.41,2,0.67,3,0.92,4,1,5)
Dez	DISC(0.63,0,1,1)	DISC(0.365,2,0.674,3,0.82,4,1,5)

Com a partir da definição da ocorrência e o respectivo impacto de um evento de chuva, o módulo responsável pelo processo de secagem utiliza a distribuição estatística das umidades do rejeito, gerada pelo *Input Analyser*, para calcular o tempo de secagem com base na taxa média de redução de umidade. Deste modo, a etapa é finalizada assim que o rejeito atinge a umidade ideal de compactação de 15%. Além disso, dentro da expressão de definição do tempo de *Delay* do módulo, está inserido o produto dos dois vetores de probabilidade de chuva, determinando se haverá ou não precipitação e, em caso positivo, qual será o impacto sobre o processo de secagem.

Por fim, o último processo do submodelo é a simulação dos ensaios de controle tecnológico para verificação dos parâmetros de compactação da camada. Para isso, foi utilizado um módulo de *Hold* que garante que este processo ocorra apenas das 7:00 às 17:00, uma vez o laboratório de controle tecnológico opera apenas em horário administrativo. Com a conclusão do ensaio, o status do setor é alterado novamente para disponível e um módulo de *Dispose* computa a camada liberada.

O quantitativo de equipamentos utilizados para a simulação em seu cenário-base, assim como a definição de dados que foi utilizada para eles, estão descritos na Tabela 4.

Tabela 4 – Quantitativo de equipamentos.

Equipamentos	Modelo	Tipo	Quantidade	Processo
Caminhão Basculante	SANY SKT90S	Entidade	20	Transporte
Trator de esteira	JOHN DEERE 850J	Recurso	8	Espalhamento
Rolo compactador	SANY C-10	Recurso	3	Compactação
Escavadeira	SANY SY750H	Recurso	2	Carregamento

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Análise dos resultados

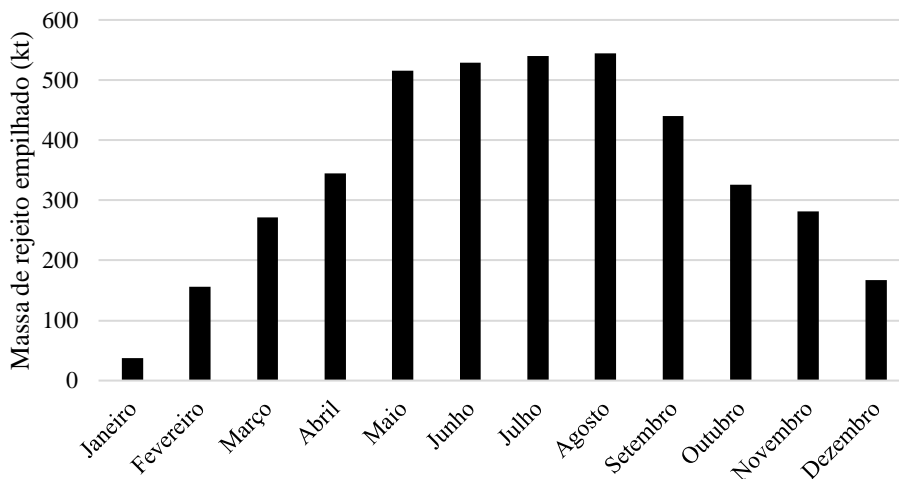
A partir do modelo desenvolvido, foram realizadas 30 replicações da simulação de um ano de operação em um cenário base, em que foram utilizadas as condições operacionais atuais da mineradora, visando validar o modelo computacional, além de avaliar o cenário da operação atual de empilhar uma projeção de geração de rejeitos de um projeto futuro, buscando entender os pontos de otimização para que a operação se torne sustentável. Nesse sentido, a partir da simulação do cenário base, pode-se obter a relação entre a massa que foi empilhada de maneira controlada nos setores das pilhas, e a massa que foi destinada às praças intermediárias, regiões destinadas ao armazenamento do material de maneira temporária, que permitem que o volume da pilha pulmão da filtragem de rejeito tenha um escoamento da geração de rejeitos, evitando uma possível paralisação da operação. Portanto, ao final da simulação, quanto menor o volume destinado às praças intermediárias, mais eficiente e produtivo foi o processo de empilhamento. No entanto, é inevitável a destinação de materiais para estas praças, vez que em uma parcela significativa do ano as operações ficam paralisadas devido às chuvas, que impedem que as camadas dos setores atinjam a umidade ótima para compactação.

Por meio da simulação do cenário base, foram obtidas informações sobre a relação entre a massa empilhada de maneira controlada nos setores das pilhas e a massa destinada às praças intermediárias, áreas destinadas ao armazenamento temporário do material. Na análise da simulação, uma menor destinação de massa para as praças intermediárias, em relação a massa efetivamente empilhada, é indicativo de um processo de empilhamento mais eficiente e produtivo. No entanto, a alocação de materiais para essas praças é uma realidade inevitável, dado que uma parcela considerável do ano é afetada por paralisações operacionais ocasionadas por chuvas, a qual impede que a camada dos setores alcance a umidade ideal para compactação.

Os resultados do cenário-base demonstram que, 4,2 milhões de toneladas do rejeito foram empilhadas de maneira controlada, que representa 51% da geração anual de rejeitos, enquanto o restante foi destinado às praças intermediárias. Esse resultado destaca a necessidade de otimização do processo de empilhamento, a fim de melhorar a eficiência e reduzir a dependência das áreas de armazenamento temporário.

A mina simulada está situada em uma região de clima tropical, com estações chuvosas e secas bem definidas. Portanto, essa sazonalidade pluviométrica foi modelada para impactar as operações de empilhamento de rejeitos. O Gráfico 1 mostra as massas de rejeito empilhadas nas camadas por mês. Como esperado, as massas de rejeito empilhadas foram inferiores entre os meses de maior frequência e intensidade de chuvas, outubro a março, ao se comparar com os meses de seca, normalmente de abril a setembro.

Gráfico 1 – Massa total de rejeito compactada por mês.



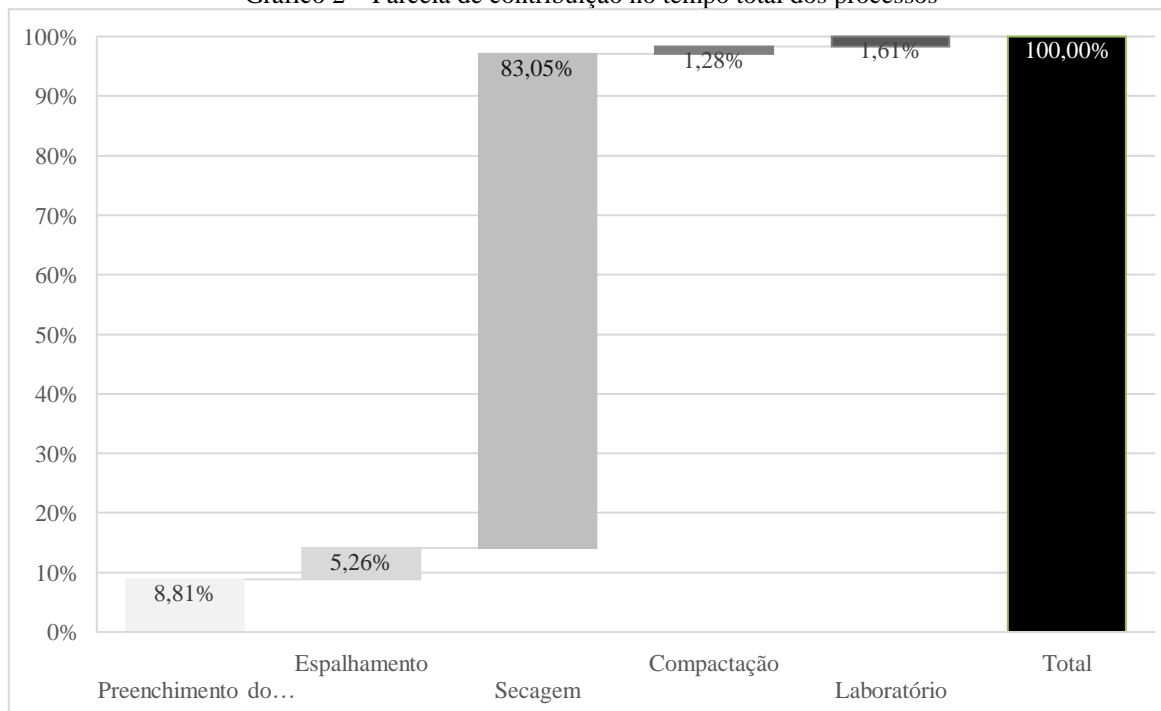
Adicionalmente, foi conduzida uma análise dos tempos médios de execução de cada processo operacional, com o objetivo de identificar os principais fatores que influenciam os tempos de ciclo, apresentados na Tabela 5. A redução do tempo necessário para alrear uma nova camada está diretamente associada ao aumento da produtividade no empilhamento. Foram também mensurados os tempos médios dos macroprocessos, que incluem o tempo para preenchimento completo de um setor e o tempo médio de tratamento da camada, abrangendo todas as atividades desde o espalhamento do material até a liberação da camada.

Tabela 5 – Tempo médio de execução dos processos.

Macroprocessos	Tempos (h)
Preenchimento do setor	16,44
	170,24

Tratamento da camada	170,24
Carregamento	0,05
Transporte Cheio	0,27
Descarga	0,02
Transporte Vazio	0,21
Espalhar	9,82
Secar	155,03
Compactar	2,39
Ensaio	3

Gráfico 2 – Parcela de contribuição no tempo total dos processos

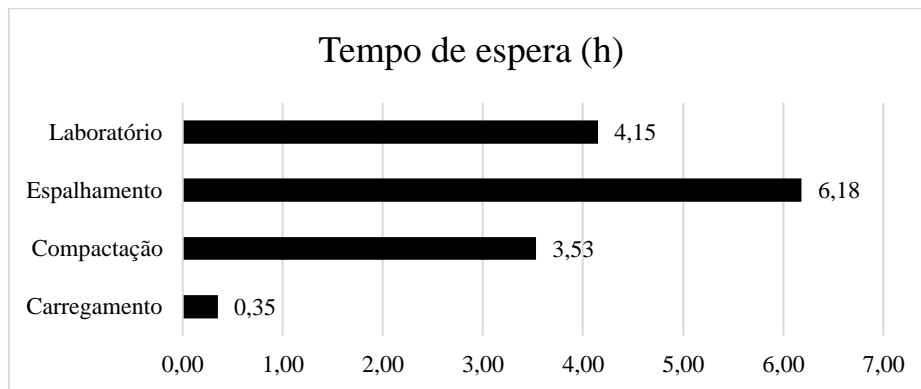


No

Gráfico 2 são apresentadas a porcentagem de tempo gasto em cada processo em relação ao tempo total. De acordo com esse gráfico, o processo de secagem representa 83% do tempo total do ciclo de alteamento de uma camada. Esse resultado evidencia a necessidade de focar na otimização desse processo para melhorar a eficiência da operação como um todo.

Na operação de empilhamento de rejeitos podem ocorrer perdas de produtividade devido à filas ou espera por recursos que já estão alocados em outros locais ou indisponíveis, realizando determinada atividade do fluxo de alteamento de uma camada. Nesse sentido, por meio dos resultados da simulação, foi possível quantificar as médias dos tempos de espera de cada processo, conforme apresentado no Gráfico 3. A etapa de espalhamento do material no setor apresentou um tempo médio de 6,18 horas de espera por tratores de esteira para início da atividade. Esse dado indica que o aumento da frota de tratores de esteira pode ser uma solução viável para reduzir esses tempos de espera. Além disso, o funcionamento restrito do laboratório, limitado ao horário administrativo, foi outro fator significativo que gerou atrasos, especialmente nas camadas compactadas fora desse período. Isso aponta para a necessidade de ajustes operacionais que possam minimizar esses atrasos e otimizar o processo como um todo.

Gráfico 3 – Tempo de espera para início do processo.



5.2. Otimização da operação

Uma alternativa eficaz para o aumento da capacidade produtiva do empilhamento de rejeitos é a expansão das áreas disponíveis para esse fim. Contudo, a liberação de novas áreas envolve uma série de exigências complexas e morosas. Entre elas, destaca-se a necessidade de negociação de terrenos com superficiários e o cumprimento de etapas regulamentares, como o licenciamento ambiental. Esse processo inclui a elaboração de Estudos de Impacto Ambiental (EIA) e Relatórios de Impacto Ambiental (RIMA), que podem demandar anos para sua conclusão. Após a obtenção da Licença de Operação (LO), são necessárias obras de infraestrutura, como a supressão da vegetação e a implantação de drenos de fundo para preparar a área para o empilhamento de rejeitos. Portanto, a expansão das áreas de empilhamento exige não apenas um longo prazo, mas também um planejamento abrangente que contemple aspectos ambientais, legais e de engenharia.

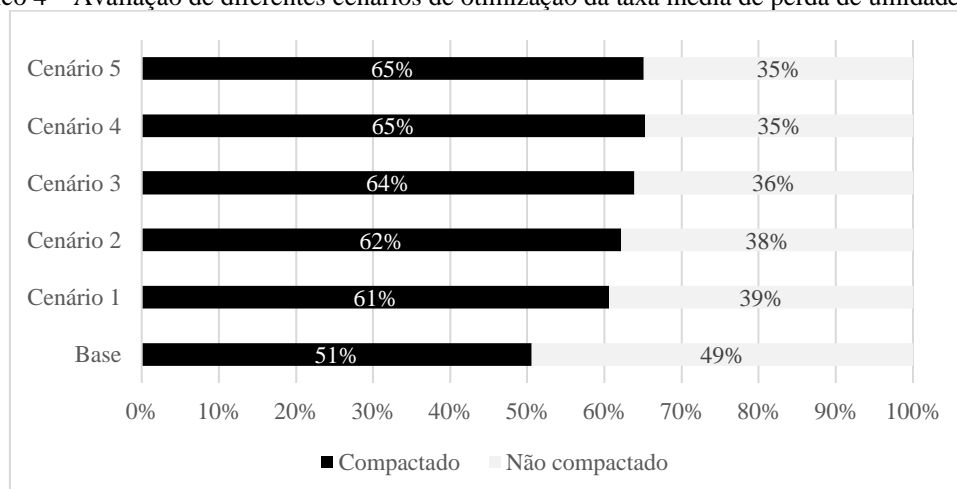
Portanto, diante desse contexto, a solução de curto e médio prazo para absorver o aumento da produção delinea-se na otimização da operação. Para fundamentar essa estratégia, foi aplicado o Princípio de Pareto, também conhecido como a regra 80/20, que postula que uma pequena parcela das causas é responsável pela maior parte dos resultados (Pareto, 1906). No caso da operação de empilhamento de rejeitos, observou-se por meio do

Gráfico 2 que o processo de secagem, que representa mais de 80% do tempo total do ciclo, é o principal indicador de eficiência do processo.

Dessa forma, o foco para melhoria do processo de empilhamento de rejeito a seco deve ser na redução do tempo de secagem. Há alternativas promissoras para otimizar o processo de secagem de rejeitos filtrados, como o uso de aditivos. Um estudo conduzido por Rissoli *et al.* (2024) concluiu que o uso de cal virgem possibilita um aumento de eficiência na secagem de rejeitos de minério de ferro. Além disso, outros materiais podem ser investigados para aumentar a eficiência do empilhamento a seco. Segundo Machado (2022), a incorporação de pequenas quantidades de estéril ao rejeito resulta em um aumento na umidade ótima da mistura, o que impacta positivamente ao tempo de secagem.

Com base nessa análise, foram simuladas 30 replicações de diferentes cenários com o objetivo de aprimorar a eficiência desse processo crítico. No Cenário 1, foi simulado um aumento de 50% na taxa de perda de umidade diária durante a secagem em relação ao cenário-base. Para o Cenário 2, foi simulada um aumento de 75%, no Cenário 3 de 100%, no Cenário 4 de 125%, e no Cenário 5 de 150%. No Gráfico 4 são apresentadas as proporções percentuais entre a massa efetivamente compactada e a destinada às praças intermediárias.

Gráfico 4 – Avaliação de diferentes cenários de otimização da taxa média de perda de umidade diária.



Com a análise de cenários foi possível identificar que o aumento na taxa de perda de umidade diária pode gerar um aumento de eficiência do processo em cerca de 14% (Cenários 4 e 5), representando um ganho significativo na massa compactada e uma melhora substancial na produtividade. Observa-se que, após certo ponto, o aumento da taxa de

secagem não gera ganhos mais expressivos, já que as condições climáticas, particularmente nos meses mais chuvosos, impõem uma limitação. Nesses períodos, uma parte significativa do volume de rejeitos gerado ao longo do ano não pode ser empilhada, independentemente da eficiência da secagem. O aumento da massa empilhada contribui para a redução dos custos operacionais, uma vez que essa parcela é transportada diretamente para os setores de disposição final, enquanto os materiais enviados para praças intermediárias precisam ser retomados posteriormente, passando novamente pelos processos de carregamento e descarga e, geralmente, exigindo valores maiores de DMT.

6. CONCLUSÃO

Com base na revisão de literatura realizada, este trabalho se destaca como pioneiro na aplicação da técnica de simulação de eventos discretos para a avaliação de gargalos em cenários de uma operação de empilhamento de rejeitos a seco em uma mineradora. A relevância deste estudo reside no uso de eventos estocásticos e processos dinâmicos, os quais permitem uma aproximação da realidade do processo analisado.

A operação de empilhamento de rejeitos a seco é um processo complexo, influenciado por uma série de fatores internos e externos, o que torna desafiadora a criação de um modelo de simulação fiel à realidade. A análise desenvolvida neste estudo permitiu atingir os objetivos propostos. Os resultados do cenário-base demonstraram um comportamento muito próximo do observado em campo, especialmente no que se refere ao impacto das condições climáticas, como a chuva, sobre a eficiência da operação.

O modelo proposto se mostrou uma ferramenta valiosa e flexível, permitindo a avaliação de múltiplos cenários por meio da manipulação de variáveis críticas. Isso possibilita um planejamento mais robusto e assertivo para operações de longo prazo em mineração. Nos cenários simulados, foi possível identificar que o processo de secagem do rejeito exerce uma influência predominante no ciclo operacional, afetando significativamente o tempo total de operação. O cenário-base revelou um desequilíbrio entre a massa compactada e a massa destinada às praças intermediárias, apontando para a necessidade de otimização.

Foi simulado um aprimoramento na etapa de secagem, resultando em um aumento expressivo na massa compactada ao final de um ano de operação. Este resultado reforça a importância de estudos e inovações voltados para aumento da eficiência do processo de empilhamento, especialmente no que diz respeito à etapa de secagem. Conforme apontado nos trabalhos referenciados, o uso de aditivos apresenta-se como uma alternativa promissora para intensificar a taxa de perda de umidade, comprovando a viabilidade dos cenários simulados.

Para pesquisas futuras, planeja-se incorporar a dinâmica de retomada das praças intermediárias, o que poderá agregar maior realismo ao modelo e identificar novas oportunidades de aprimoramento operacional.

7. REFERÊNCIAS

AUTOMATION, Rockwell. Getting started with Arena. Rockwell Automation. Supersedes Publication, 2022.

AECOM; MPMG. Diretrizes Técnicas E Socioambientais Para Projetos De Pilhas De Rejeitos De Mineração. [s. l.], 2024.

AGYEL, G.; KATENG, E. A. An Innovative Pedagogical Simulation and Animation of a Shovel-Truck System. Nigerian Journal of Technology, [s. l.], v. 42, n. 1, p. 122–129, 2023.

CRYSTAL, C.; HORE, C.; EZAMA, I. Filter-Pressed Dry Stacking: Design Considerations Based on Practical Experience. Proceedings Tailings and Mine Waste 2018, [s. l.], p. 209–2019, 2018.

DAVIES, Michael. Filtered Dry Stacked Tailings-The Fundamentals Filtration-End Member of the Tailings Continuum. [s. l.], 2011.

DE OLIVEIRA, Afonso Vaz *et al.* Improvement of the Logistics Flows in the Receiving Process of a Warehouse. Logistics, [s. l.], v. 6, n. 1, 2022.

DENDLE, Nicholas; ISOKANGAS, Erik; CORRY, Paul. Efficient simulation for an open-pit mine. Simulation Modelling Practice and Theory, [s. l.], v. 117, n. August 2021, p. 102473, 2022.

DIMITRIADIS, Dimitris; ZACHAREAS, Efstratios; GAZEA, Vithleem. Upgrading of a Tailings Management Facility for the Disposal of Dry Stack Tailings. [s. l.], p. 132, 2022.

GOMES, Reinaldo Brandao; DE TOMI, Giorgio; ASSIS, Paulo Santos. Iron ore tailings dry stacking in Pau Branco mine, Brazil. Journal of Materials Research and Technology, [s. l.], v. 5, n. 4, p. 339–344, 2016.

HOLTZ, Robert D.; KOVACS, William D.; THOMAS C. SHEAHAN. An Introduction to Geotechnical Engineering. [s. l.], v. 2, n. 4, p. 1–9, 1981.

MACHADO, Leonardo da Silva. Estabilização de rejeitos de minério de ferro filtrados com uso de aditivos para disposição em pilhas compactadas (dry stacking). 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2022. Orientador: Eduardo Antonio Gomes Marques. Coorientador: Roberto Lopes Ferraz.

MATHEY, M. Simulation of production processes and associated costs in mining using the Monte Carlo method. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, [s. l.], v. 122, n. 12, p. 697–703, 2022.

PARETO, Vilfredo. *Manuale di Economia Politica*. Piccola Biblioteca Scientifica, Milan. Translated into English by AS Schwier (1971), *Manual of Political Economy*. 1906.

RISSOLI, Ana Luisa Cesar *et al.* Dry Stacking of Filtered Iron Ore Tailings: Comparing On-Field Performance of Two Drying Methods. *Geotechnical and Geological Engineering*, [s. l.], v. 42, n. 4, p. 2937–2948, 2024.

RODOVALHO, Edmo da Cunha. Aplicações de ferramentas de simulação em operações mineiras para determinação de índices operacionais utilizados em planos de lavra adaptados ao estudo de caso da Mineração Casa de Pedra - CSN (Congonhas/MG). [s. l.], p. 111, 2013.

SOTO, I.; ANANI, A.; CÓRDOVA, E. A discrete event simulation approach for mine development planning at Codelco's New Mine Level. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, [s. l.], v. 122, n. 10, p. 549–559, 2022.

TORRES, V. F. Navarro *et al.* Integrated optimization and simulation models for short-term open-pit mine planning. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, [s. l.], v. 120, n. 11, p. 617–626, 2020.