



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE TUCURUÍ
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

JOSÉ ARMANDO SOUSA RIBEIRO JUNIOR

**MODERNIZAÇÃO DE UM CHUTE DE TRANSFERÊNCIA EM UMA
MINERADORA DE BAUXITA: UMA ABORDAGEM VIA SIMULAÇÃO DEM**

TUCURUÍ
2024

JOSÉ ARMANDO SOUSA RIBEIRO JUNIOR

**MODERNIZAÇÃO DE UM CHUTE DE TRANSFERÊNCIA EM UMA
MINERADORA DE BAUXITA: UMA ABORDAGEM VIA SIMULAÇÃO DEM**

Trabalho de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Mecânica, do Campus Universitário de Tucuruí, da Universidade Federal do Pará, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador(a): Dr. André Luiz Amarante
Mesquita

TUCURUÍ
2024

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos
pelo(a) autor(a)**

Ribeiro Junior, José Armando Sousa.

Modernização de um chute de transferência em uma mineradora de bauxita: uma abordagem via simulação DEM / José Armando Sousa Ribeiro Junior. — 2024.

xvii, 64 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. André Luiz Amarante Mesquita Trabalho de Conclusão (Graduação) - Universidade Federal do Pará, Campus Universitário de Tucuruí, Faculdade de Engenharia Mecânica, Tucuruí, 2024.

1. Chute de Transferência, Simulação DEM, Bauxita, Transporte de Materiais.. I. Título.

CDD 620.100113

JOSÉ ARMANDO SOUSA RIBEIRO JUNIOR


**MODERNIZAÇÃO DE UM CHUTE DE TRANSFERÊNCIA EM UMA
MINERADORA DE BAUXITA: UMA ABORDAGEM VIA SIMULAÇÃO DEM**

Trabalho de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Mecânica, do Campus Universitário de Tucuruí, da Universidade Federal do Pará, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.


Data da aprovação: 23 / 12 / 2024

Conceito: Excelente


BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 **ANDRE LUIZ AMARANTE MESQUITA**
Data: 13/01/2025 08:28:14-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. André Luiz Amarante Mesquita
NDAE/UFPA

Documento assinado digitalmente
 **MACIEL DA COSTA FURTADO**
Data: 13/01/2025 10:17:07-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Maciel da Costa Furtado
FEM/CAMTC/UFPA

Documento assinado digitalmente
 **ARTHUR DOS REIS LEMOS FONTANA**
Data: 13/01/2025 18:01:00-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Me. Arthur dos Reis Lemos Fontana
FEM/CAMTUC/UFPA

Dedico este trabalho a Deus, minha mãe Waldirene, meu pai José Armando, meus irmãos e a todas as pessoas que, de uma forma ou de outra, me ajudaram a chegar até aqui. Este trabalho representa mais um passo rumo ao futuro que vocês me ajudaram a construir.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, que me deu forças, sabedoria e fé para chegar até aqui, mesmo nos momentos mais desafiadores.

Agradeço à minha mãe, Waldirene Nunes Rodrigues, e ao meu pai, José Armando Sousa Ribeiro, por serem o meu porto seguro e exemplos de dedicação e resiliência, e que mesmo com todos os percalços, conseguiram abrir o caminho para que eu chegasse até aqui. Aos meus irmãos, Rafaela Nunes Rodrigues, Eric Nunes Rodrigues e Davi Rodrigues Ribeiro, que sempre acreditaram em mim e me apoiaram incondicionalmente, sempre acreditando na minha capacidade. A toda a minha família, que sempre esteve ao meu lado, confiando no meu potencial e me incentivando em cada passo.

Agradeço a minha namorada, Emily Garcia pelo apoio constante, por ser minha motivação e minha parceira, e pela compreensão durante todo esse processo acadêmico.

Aos meus amigos, que nunca deixaram de acreditar que eu era capaz de alcançar grandes conquistas, mesmo nos momentos em que eu mesmo duvidei.

Ao meu orientador, André Mesquita, pela paciência, dedicação e pelos ensinamentos valiosos que me ajudaram a evoluir ao longo dessa jornada, mostrando as portas que a humildade pode abrir.

À minha “panelinha”, composta pelos amigos Guilherme, Adrienny, Daniel e Otávio, que fizeram os dias mais leves, suportáveis e cheios de boas lembranças. A amizade de vocês tornou cada desafio mais interessante e divertido.

Agradeço aos membros do laboratório FluidPar: Arthur Fontana, Danilo Silva, Ryan Louzada, Hermeson Wanzeler, Maycon Castro e Alex Lopes pelos ensinamentos, apoio e parceria fundamentais durante esta trajetória. E agradeço também ao laboratório por me fornecer os conhecimentos e recursos necessários para realizar este trabalho através dos ensaios em laboratório e laboratório de mecânica computacional em parceria com a faculdade de engenharia mecânica. Também aos meus colegas bolsistas, Geovane Nascimento e Jonatas, que dividiram comigo essa experiência e aprendizado.

Ao meu amigo Geovane Santiago, com quem pude compartilhar importantes momentos durante o estágio, e ao meu gestor de estágio, Thelri Ferreira, pela orientação, confiança e apoio no desenvolvimento profissional.

Aos meus professores Maciel Costa, Walter Santos, Fernando Nunes, Jessé Padilha e aos demais, por contribuírem significativamente na minha formação acadêmica e profissional, sendo exemplos de dedicação e compromisso com o ensino.

Por fim, deixo aqui minha eterna gratidão a todos que, direta ou indiretamente, fizeram parte dessa caminhada. Cada um de vocês foi essencial para que eu chegasse até aqui.

*"Acredite que você pode, e você já estará no meio do caminho."
(Theodore Roosevelt)*

RESUMO

Este trabalho apresenta a modernização do projeto de um chute de transferência utilizado no manuseio de bauxita, com o objetivo de reduzir problemas como desgaste excessivo, desalinhamento do fluxo de material e frequência elevada de manutenções corretivas. Para tal, foram realizados ensaios experimentais para obtenção dos parâmetros de simulação, incluindo granulometria, ângulo de repouso e atrito material-parede, cujos resultados foram utilizados na calibração de um modelo numérico desenvolvido com o Método dos Elementos Discretos (DEM). A simulação permitiu identificar os pontos críticos no projeto atual e propor soluções, como alterações geométricas no chute e inclusão de defletores. Os resultados obtidos mostraram melhorias, como a redução de 6,1% nos esforços normais aplicados à correia transportadora, redução de 23,3% nos esforços cisalhantes e uma redução no desalinhamento da correia de 15,9% para 1,1% com a inclusão da defletora, além de um alinhamento adequado do fluxo de material. Conclui-se que a aplicação da simulação DEM é uma ferramenta eficaz para otimização de equipamentos, trazendo ganhos operacionais e econômicos para a indústria de mineração.

Palavras-chave: Chute de Transferência; Simulação DEM; Bauxita; Transporte de Materiais.

ABSTRACT

This work presents the modernization of a transfer chute used in bauxite transportation, aiming to reduce issues such as excessive wear, misalignment of material flow, and frequent corrective maintenance. For this purpose, experimental tests were performed to obtain simulation parameters, including granulometry, angle of repose, and material-wall friction, whose results were used to calibrate a numerical model developed using the Discrete Element Method (DEM). The simulation identified critical points in the current design and proposed solutions, such as geometric modifications to the chute and including deflectors. The results demonstrated improvements, including a 6.1% reduction in normal stresses applied to the conveyor belt, a 23.3% reduction in shear stresses, and a reduction in belt misalignment from 15.9% to 1.1% with the inclusion of the deflector, as well as proper alignment of material flow. It is concluded that DEM simulation is an effective tool for optimizing equipment and providing operational and economic gains for the mining industry.

Keywords: *Transfer Chute; DEM Simulation; Bauxite; Material Handling.*

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Perfil litológico da mina de Juriti – PA.	20
Figura 2 - Fluxograma simplificado da usina de beneficiamento de bauxita de Juruti	21
Figura 3 - Transportador de correia	22
Figura 4 - Componentes de um transportador de correia.....	23
Figura 5 - Sistema de acionamento de um transportador de correia.....	24
Figura 6 - Componentes de uma correia transportadora.....	25
Figura 7 - Tipos de tambores	25
Figura 8 - Tipos de roletes. A: Roletes de carga; B: Roletes de impacto; C: roletes de retorno.....	26
Figura 9 - Tensionadores de correia. A: Tensionador por gravidade. B: Tensionador manual.....	27
Figura 10 - Modelo de chute de transferência.	28
Figura 11 - Bancadas de um chute de transferência	29
Figura 12 - Guia lateral.....	30
Figura 13 - Chute de transferência estudado	31
Figura 14 - Altura de queda do chute	32
Figura 15 - Material desalinhado sobre a correia	32
Figura 16 - Local de queda da bauxita.....	33
Figura 17 - Zona de transição da correia	34
Figura 18 - Sistema de medição do ângulo de repouso.	37
Figura 19 - Esquema de medição dos ângulos.....	38
Figura 20 - Ilustração dos componentes do ensaio de célula Jenike.	39
Figura 21 - Célula Jenike empregada ao ensaio de atrito entre partículas.....	41
Figura 22 - Caixa de fluxo utilizada nos ensaios de escoabilidade.	40
Figura 23 - Fluxograma de processo do BFA.....	42
Figura 24 - Tela principal do BFA.	43
Figura 25 - Distribuição de componentes no BFA	44
Figura 26 - Inserção de componentes na aba " <i>components</i> ".	45
Figura 27 - Conteúdo da aba " <i>simulations</i> "	45
Figura 28 - Conteúdo da aba " <i>Run Manager</i> "	46
Figura 29 - Comparação entre ensaio na caixa de fluxo e modelo numérico	47

Figura 30 - Resultado da calibração do modelo numérico comparado ao ensaio experimental para defletora de 90°	48
Figura 31 - Desenho CAD do sistema de transferência do 631B-TP-0010.....	51
Figura 32 - Vista frontal da simulação	52
Figura 33 - Vista lateral da simulação do chute.....	52
Figura 34 - Esforços normais aplicados na correia transportadora - Atual.	53
Figura 35- Esforços cisalhantes aplicados na correia transportadora - Atual.....	53
Figura 36 - Extensão da rampa do chute (vista lateral).	54
Figura 37 - Instalação da defletora no módulo inferior.	55
Figura 38 - Esforços normais na correia (chute modificado).	55
Figura 39 - Esforços cisalhantes aplicados na correia (chute modificado).....	56
Figura 40 - Comparação entre o desalinhamento Atual x Modificado.....	56
Figura 41 - Desalinhamento do projeto atual.....	57
Figura 42 - Desalinhamento do novo projeto	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Ângulo de repouso da bauxita a 5% de umidade.....	38
Tabela 2 - Resultados das tensões do experimento	39
Tabela 3 - Resultado da calibração do modelo numérico comparado ao ensaio experimental para defletora de 105°	48
Tabela 4 - Comparação entre os ângulos de repouso dos ensaios experimental e numérico.	49
Tabela 5 - Resultados da caracterização do material.....	49
Tabela 6 - Resultados dos esforços atuantes na correia.....	58
Tabela 7 - Comparação entre os desalinhamentos do projeto atual e o modificado.....	59

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

BFA - Bulk Flow Analyst

CAMTUC - Campus de Tucuruí

DEM - *Discrete Element Method* (Método dos Elementos Discretos)

FLUIDPAR - Laboratório de Fluidodinâmica e Particulados

kg - Quilogramas

m - Metro

mm - Milímetros

NBR - Norma Brasileira Regulamentadora

NBR NM - Norma Brasileira Norma Mercosul

PVC - Policloreto de Vinila

s - Segundos

TC - Transportador de Correia

t - Tonelada

UFPA - Universidade Federal do Pará

h - Hora

LISTA DE SÍMBOLOS

% - Por cento

β – Ângulo de repouso

m^3 - Metro cúbico

Q - Taxa de fluxo de massa

ρ - Densidade

g - Aceleração da gravidade

d - Diâmetro da partícula

ρ_b - Densidade aparente do material granular

W - Umidade

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	OBJETIVO	19
1.1.1	<i>Objetivos específicos</i>	19
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1	PROCESSO DA BAUXITA	20
2.1.1	<i>Beneficiamento da bauxita</i>	20
2.2	TRANSPORTADORES DE CORREIA	21
2.2.1	<i>Componentes</i>	22
2.2.2	<i>Práticas de Manutenção e Redução do Desgaste</i>	27
2.3	CHUTES DE TRANSFERÊNCIA	28
2.3.1	<i>Componentes do chute</i>	29
2.4	APRESENTAÇÃO DO CHUTE ESTUDADO	30
2.4.1	<i>Problemas encontrados no chute</i>	31
2.4.2	<i>Problemas no transportador de correia</i>	33
2.4.3	<i>Conseqüências para o Sistema e Operação</i>	35
3	MATERIAIS E MÉTODOS	36
3.1	CARACTERIZAÇÃO E PROPRIEDADES DO MATERIAL	36
3.1.1	<i>Granulometria</i>	36
3.1.2	<i>Ângulo de Repouso</i>	37
3.1.3	<i>Atrito de Parede</i>	38
3.1.4	<i>Escoabilidade em Caixa de Fluxo</i>	39
3.1.5	<i>Atrito Material-Material (Cisalhamento Direto)</i>	40
3.2	SIMULAÇÃO DEM	41
3.2.1	<i>Software de simulação DEM</i>	42
3.2.2	<i>Calibração do modelo numérico</i>	46
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	51
4.1	SIMULAÇÃO DO PROJETO ATUAL DO CHUTE	51
4.2	MODIFICAÇÕES NO PROJETO DO CHUTE E NOVAS SIMULAÇÕES	54
4.2.1	<i>Análise do Desalinhamento</i>	56
4.3	COMPARAÇÃO QUANTITATIVA DOS RESULTADOS	58

4.4	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	58
4.4.1	<i>Impacto nas Tensões Aplicadas.....</i>	58
4.4.2	<i>Alinhamento do Fluxo de Material.....</i>	59
4.4.3	<i>Implicações na Durabilidade da Correia e nos Custos Operacionais... ..</i>	59
5	CONCLUSÃO.....	61
5.1	LIMITAÇÕES E SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS.....	62
	REFERÊNCIAS.....	63

1 INTRODUÇÃO

Em todo o mundo, os transportadores de correia são o sistema de transporte mais favorável quando se trata de movimentar materiais sólidos a granel por longas distâncias, especialmente em áreas onde a infraestrutura, como estradas, é subdesenvolvida ou inexistente. Embora a configuração básica do transportador de correia, com uma correia sem fim estendida entre uma polia motriz e uma de retorno, suportada por roletes, placas ou ar, seja um conceito comprovado, as crescentes demandas de transporte de materiais a granel continuam a pressionar a tecnologia de transportadores de correia ao seu limite (Alspaugh, 2008).

Transportadores de correia são amplamente utilizados na mineração devido à sua capacidade de mover grandes volumes de material de forma contínua e eficiente por longas distâncias. Segundo Velmurugan (2014), um transportador de correia tem a vantagem de simplicidade de construção, alta eficiência e baixos requisitos de energia e economia de manutenção. Essas correias consistem em uma cinta de material flexível, geralmente de borracha, que se desloca sobre rolos e tambores, conectando diferentes etapas da operação.

No entanto, apesar de sua eficiência, o funcionamento adequado dos transportadores de correia depende de diversos componentes, sendo os chutes de transferência um dos mais importantes. De acordo com Doroszuk et al. (2021), os pontos de transferência são componentes críticos de grandes sistemas de transportadores de correia na indústria de mineração, e seu funcionamento adequado é essencial para o desempenho adequado de outros elementos. Os chutes de transferência são estruturas que garantem a transição do material de uma correia para outra ou para outros equipamentos. Se mal projetados ou desgastados, podem resultar em obstruções, aumento de desgaste na correia e desalinhamento.

O presente trabalho tem como objetivo analisar e melhorar o desempenho de um chute de transferência em uma mineradora de bauxita, que atualmente apresenta problemas de desalinhamento no fluxo de material e desgaste acelerado das correias transportadoras. Para isso, será utilizada a simulação numérica baseada no Método dos Elementos Discretos (DEM), permitindo uma avaliação precisa do comportamento do material durante o processo de transferência. Com essa abordagem, será possível identificar as causas exatas dos problemas, como o impacto inadequado e a distribuição desigual do material, e propor melhorias geométricas para aumentar a eficiência do chute e prolongar a vida útil do equipamento. Segundo Xie (2016), o DEM não apenas fornece dados detalhados sobre o fluxo de materiais, mas também permite avaliar as forças de colisão e os momentos que atuam sobre os componentes, possibilitando um projeto mais robusto e eficiente. Historicamente, o projeto de

chutes era feito com base em modelos empíricos e simplificados, o que frequentemente gerava configurações não adequadas. Com o avanço da tecnologia e a disponibilidade de softwares de simulação especializados, o DEM se tornou uma ótima ferramenta no dimensionamento adequado desses componentes, permitindo simulações que antecipam a influência da geometria, resultando em soluções mais eficazes e duráveis para o manuseio de materiais granulares.

A escolha desse chute em particular se justifica por sua relevância no processo produtivo da mineradora e pelos problemas operacionais já identificados. A modernização do projeto desse componente tem o potencial de trazer ganhos significativos, como a redução das paradas para manutenção, aumento da vida útil das correias e maior eficiência no transporte de materiais. Além de resolver problemas locais, este estudo poderá contribuir para a melhoria de sistemas de transporte em outras operações mineradoras, consolidando a importância da simulação numérica no aprimoramento dos processos industriais.

1.1 Objetivo

Modernização um chute de transferência existente em uma mineradora de bauxita, utilizando a simulação DEM.

1.1.1 Objetivos específicos

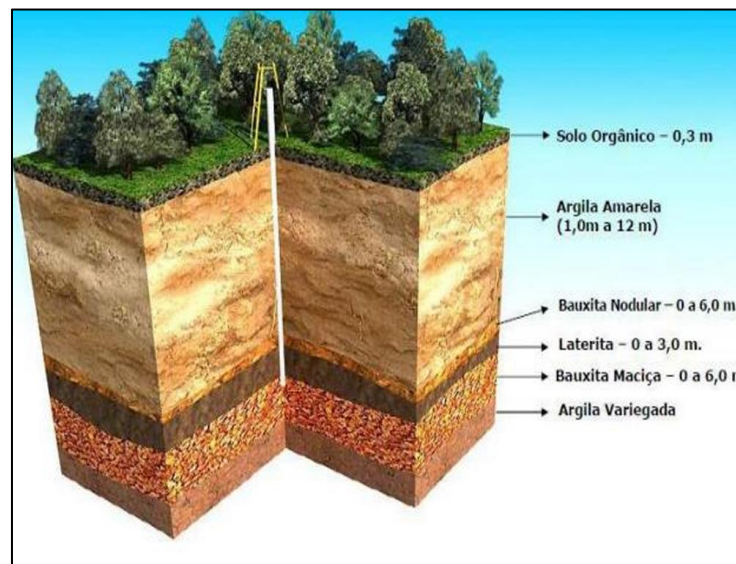
- Analisar o chute existente
- Efetuar a modelagem e simulação do chute
- Identificar as causas do desalinhamento
- Propor de modificações no projeto do chute

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Processo da bauxita

A bauxita é o principal minério de alumina (Al_2O_3), que é usado para produzir alumínio (Al). É composto por óxidos de alumínio hidratados, aluminossilicatos hidratados, óxidos de ferro, óxidos de ferro hidratados, óxido de titânio e sílica. Contém misturas de vários minerais, como gibbsita, boemita, hematita, goethita, Al-goethita, anatásio, rutilo, ilmenita, caulim e quartzo (Donoghue et al., 2014).

Figura 1 - Perfil litológico da mina de Juruti – PA.



Fonte: Lima (2024), apud Lage (2018)

A mina de Bauxita estudada nesta pesquisa, está localizada a 52 km do município de Juruti, no Oeste do estado do Pará. A reserva está estimada em 700 milhões de toneladas métricas, possuindo um dos maiores depósitos de bauxita de alta qualidade do mundo. Na Figura 1 é possível observar o perfil litológico da mina de Juruti – PA, que é composto por: argila amarela (caulinita), bauxita nodular (gibbsita), laterita (anastase), bauxita maciça (hematita) e argila variegada (quartzo) (Lima, 2024 apud Lage, 2018).

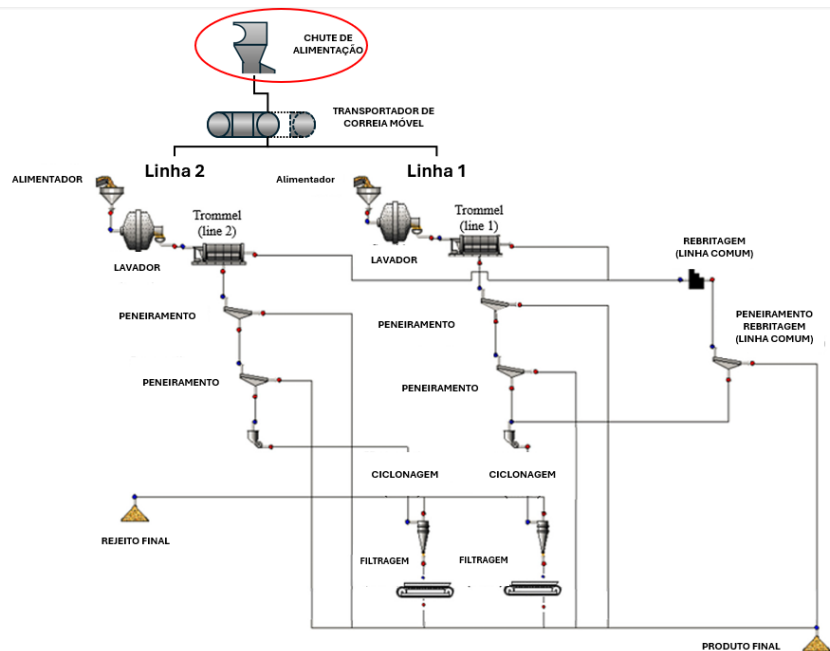
2.1.1 Beneficiamento da bauxita

De acordo com Paiva et al. (2022), o beneficiamento da bauxita envolve operações unitárias como britagem, peneiramento, classificação, filtragem e secagem (opcional). O objetivo é remover frações de argila e minerais de sílica, considerados contaminantes.

A planta de beneficiamento de Juruti possui duas linhas paralelas, cada uma com um circuito grosso (scrubber, trommel, britadores e peneiras) e um circuito fino (hidrociclones e filtro de correia), como é mostrado na Figura 2. O produto grosso tem partículas entre 76,2 mm e 1,2 mm, enquanto o produto fino tem partículas entre 1,2 mm e 0,037 mm.

O chute que será abordado nesse estudo é responsável por depositar a bauxita no transportador de correia móvel que faz a separação do minério entre a linha 1 e a linha 2, que são mostrados na Figura 2.

Figura 2 - Fluxograma simplificado da usina de beneficiamento de bauxita de Juruti



Fonte: Paiva et al. (2022)

2.2 Transportadores de correia

Os transportadores de correia são equipamentos essenciais no transporte de materiais a granel em diversas indústrias, incluindo mineração, processamento de minerais e manuseio de materiais industriais pesados. Esses sistemas proporcionam um meio eficiente e contínuo de movimentação de materiais, garantindo velocidade e segurança no transporte de grandes quantidades de matéria-prima. Transportadores de correia (Figura 3) consistem basicamente em uma correia contínua que se move sobre tambores e roletes, suportada por uma estrutura metálica e acionado por um moto redutor. São usados para mover materiais de um ponto a outro, sendo uma das soluções mais eficientes e de baixo custo para transporte em massa. Os

sistemas de transporte podem ajudá-lo a criar eficiência de armazém e otimizar as operações, isso pode ser alcançado em diferentes distâncias, diferentes materiais de transporte. Segundo Todkar & Ramgir (2018), os transportadores são especialmente úteis em aplicações que envolvem o transporte de materiais pesados ou volumosos, a maioria dos cientistas está interessada em pesquisas sobre otimização, projeto de transportadores de correia e mecanismos mais livres de riscos.

Figura 3 - Transportador de correia



Fonte: Hadzihafizovic (2023).

2.2.1 Componentes

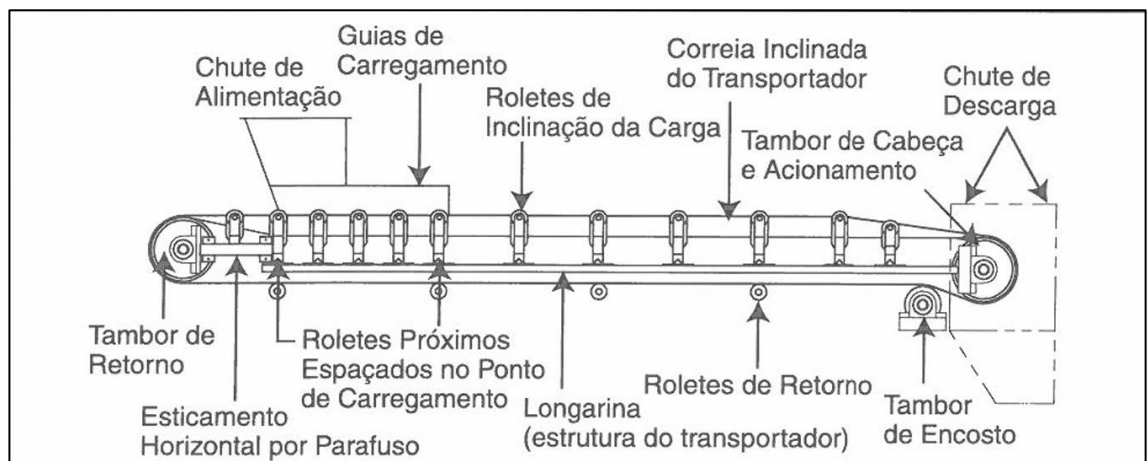
De acordo com Velmurugan et al. (2014), o sistema de correia transportadora consiste em:

- Unidade de acionamento (motor elétrico, caixa de engrenagens de acoplamento multiestágio)
- Polias / tambores (polia de acionamento e outras)
- Correias (têxteis ou com cabos de aço) com suas juntas

- Roletes
- Outros (sistemas de limpeza de correias, sistema de controle etc.)

Os componentes em questão podem ser observados na Figura 4, a figura representa um layout similar ao do transportador de correia estudado nesse documento.

Figura 4 - Componentes de um transportador de correia



Fonte: CEMA (2014).

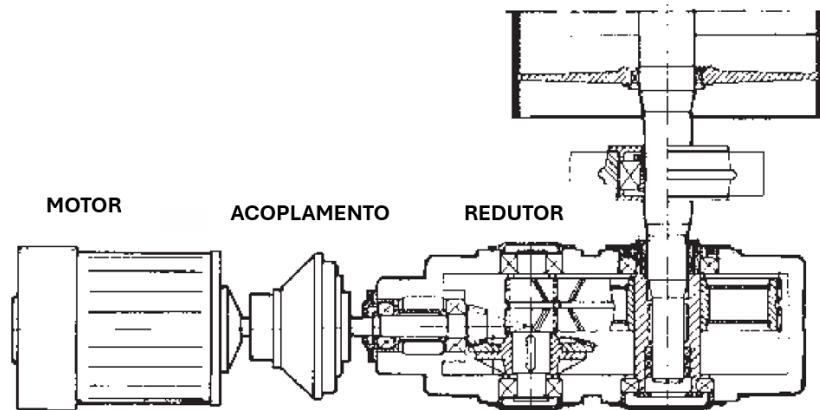
2.2.1.1 Sistema de acionamento

O sistema de acionamento é responsável por fornecer a energia necessária para movimentar a correia. Ele é composto por motores elétricos, redutores de velocidade e acoplamentos, como mostra a Figura 5. O acionamento tem como objetivo fornecer a energia mecânica necessária para movimentar a correia e o material transportado e regular a velocidade da correia de acordo com a carga e as condições operacionais.

- **Motor elétrico:** O motor fornece a energia mecânica para o sistema. Normalmente, motores de indução trifásicos são utilizados, devido à sua durabilidade e eficiência energética. A potência do motor varia conforme a capacidade do transportador e o tipo de material a ser transportado.
- **Redutor de velocidade:** Reduz a velocidade de rotação do motor para uma faixa adequada ao movimento da correia. Ele garante que a correia se mova com a velocidade necessária, evitando sobrecarga e danos ao sistema.

- **Acoplamento:** O acoplamento conecta o eixo do motor ao tambor de acionamento, transmitindo a força de forma eficiente. Existem diferentes tipos de acoplamentos, como acoplamentos flexíveis, que permitem um pequeno desalinhamento entre os eixos.

Figura 5 - Sistema de acionamento de um transportador de correia



Fonte: Adaptado de Hadzihafizovic (2023).

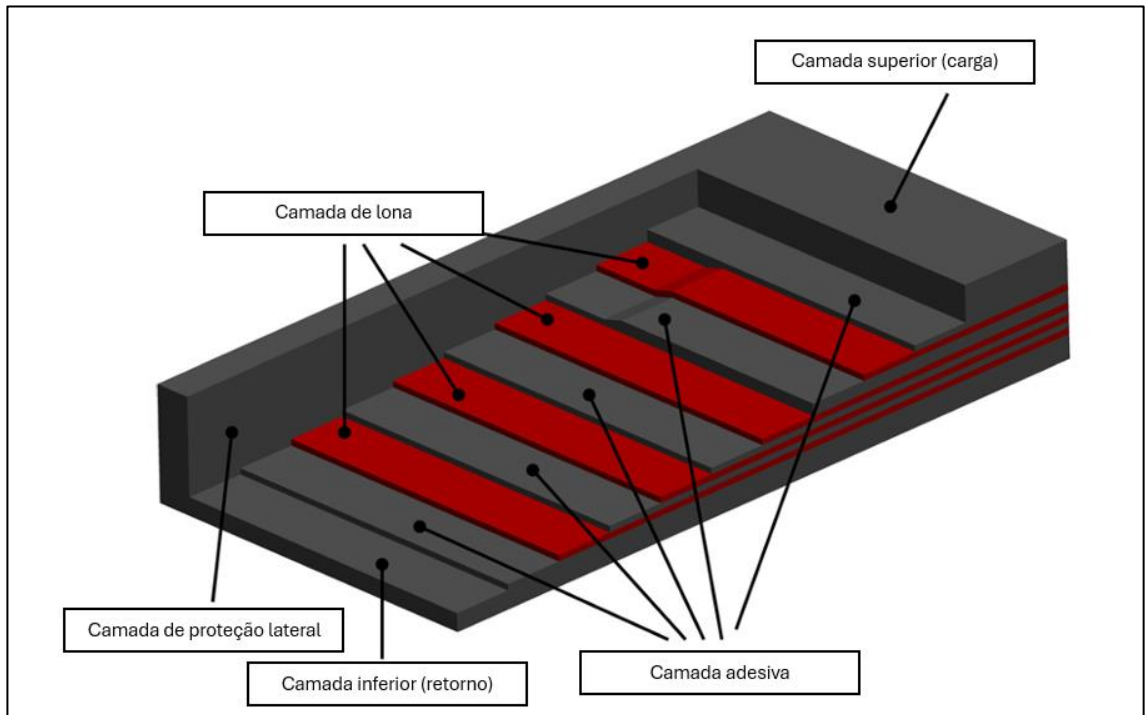
2.2.1.2 Correia transportadora

De acordo com Hadzihafizovic (2023), a correia transportadora é o componente mais importante de um sistema de transporte por correia, desempenhando várias funções essenciais. Ela deve suportar as tensões geradas durante o arranque do acionamento, garantir o transporte eficiente da carga e absorver a energia de impacto no ponto de carregamento, protegendo a integridade do sistema. Além disso, a correia precisa resistir a condições adversas, como altas temperaturas e os efeitos de substâncias químicas, incluindo materiais oleosos, gordurosos e ambientes ácidos. Outro aspecto fundamental é o cumprimento dos requisitos de segurança, como a resistência a chamas e a propriedade antiestática, garantindo a proteção tanto dos operadores quanto do equipamento. Em operações de alta abrasão, como na mineração de bauxita, correias com revestimentos especiais são recomendadas para prolongar sua vida útil e reduzir o desgaste causado pela abrasão do material transportado, como descrito por Donoghue, Frisch e Olney (2024).

As correias são geralmente compostas por várias camadas de materiais que conferem resistência mecânica e flexibilidade, como mostra a Figura 6. A camada superior é chamada de carga, que entra em contato direto com o material transportado. A camada interna (carcaça) é o tecido ou lonas de reforço (também podem ser de cabo de aço), a carcaça é o elemento de força

da correia, pois dela depende a resistência para suportar a carga, as tensões e flexões e toda a severidade a que é submetida a correia na movimentação da carga (Mercurio, 2019), e a camada inferior é chamada de retorno, que entra em contato com os tambores e roletes, a Figura 6 ilustra esses componentes em mais detalhes.

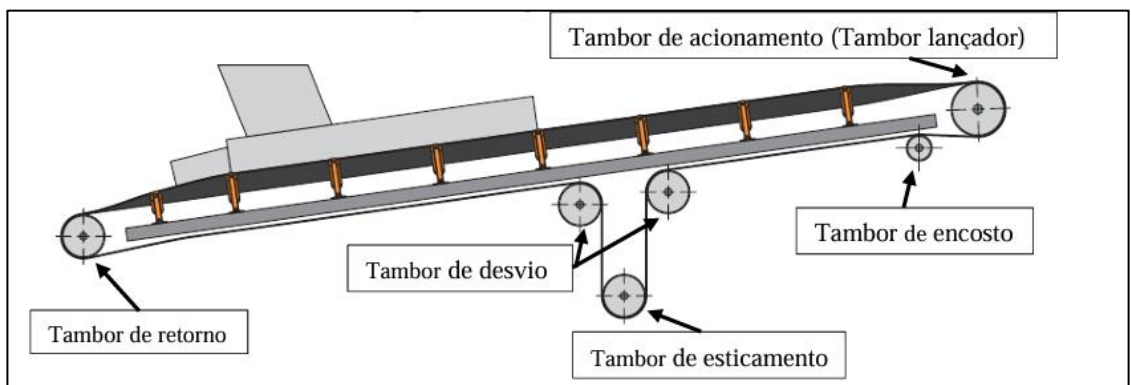
Figura 6 - Componentes de uma correia transportadora



Fonte: Fedorko et al. (2013).

2.2.1.3 Tambores

Figura 7 - Tipos de tambores



Fonte: Adaptado de Swinderman et al. (2012)

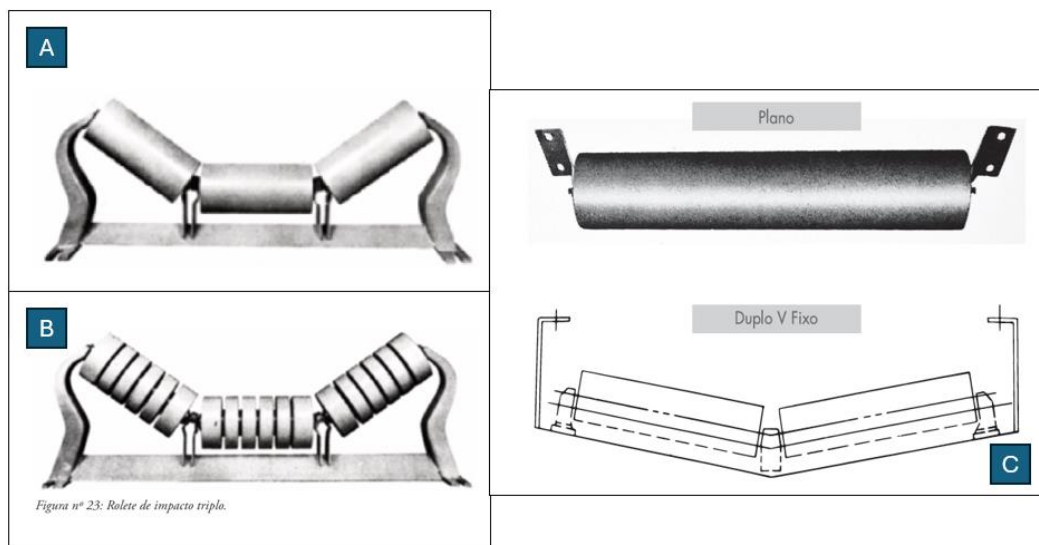
De acordo com Mercúrio (2019), os tambores são os elementos condutores em um transportador, sua atuação e localização no transportador lhe dará nome específico: tambor de acionamento, tambor de retorno, tambor de desvio, tambor de tensionamento, tambor de encosto entre outros. A Figura 7 mostra os diferentes tipos de tambores.

2.2.1.4 Roletes

De acordo com Velmurugan (2014), os roletes consistem em rolos de tubos de aço sem costura fechados por cabeças de polia em cada extremidade e equipados com eixo estacionário, rolamento antifricção e vedações. Os roletes normalmente usados são: roletes de carga, de impacto, de retorno, entre outros.

De acordo com Mercúrio (2019), os roletes de carga estão localizados no lado superior do transportador com a função de suportar a correia transportadora e a carga que está sendo movimentada por ela. Já os roletes de impacto se encontram nas áreas de carga com a finalidade de amortecer o choque provocado pelo impacto do material ao cair sobre a correia, protegendo-a contra rasgos, cortes, perfurações etc. quanto aos roletes de retorno, eles são responsáveis por sustentar a correia transportadora em seu retorno. São fixados à estrutura no lado inferior do sistema e, entre eles e a estrutura, deve haver folga que permita a perfeita visualização da correia em seu movimento. A Figura 8 ilustra os diferentes tipos de roletes.

Figura 8 - Tipos de roletes. A: Roletes de carga; B: Roletes de impacto; C: roletes de retorno.

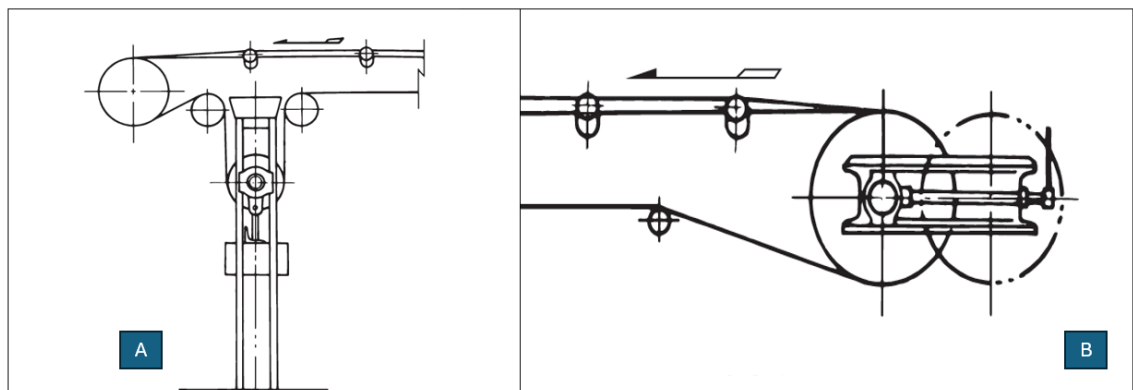


Fonte: Mercúrio (2019).

2.2.1.5 Sistema de tensionamento

De acordo com Hadzihafizovic (2023), os sistemas de tensionamento (Figura 9) são necessários para possibilitar a transmissão de força na polia de acionamento ou para acomodar mudanças no comprimento da correia à medida que a carga muda e para proporcionar uma partida suave da instalação. A escolha do sistema de recolhimento depende das condições gerais da instalação, das características de alongamento da correia, do comportamento de arranque, do clima e, eventualmente, da distância de transporte e da inclinação da instalação.

Figura 9 - Tensionadores de correia. A: Tensionador por gravidade. B: Tensionador manual



Fonte: Mercúrio (2019).

2.2.2 Práticas de Manutenção e Redução do Desgaste

A manutenção dos transportadores de correia é essencial para garantir uma operação eficiente e prolongar a vida útil do equipamento. Os principais problemas que afetam a durabilidade da correia incluem o desgaste por abrasão, impacto e a exposição a condições ambientais adversas. Práticas recomendadas incluem:

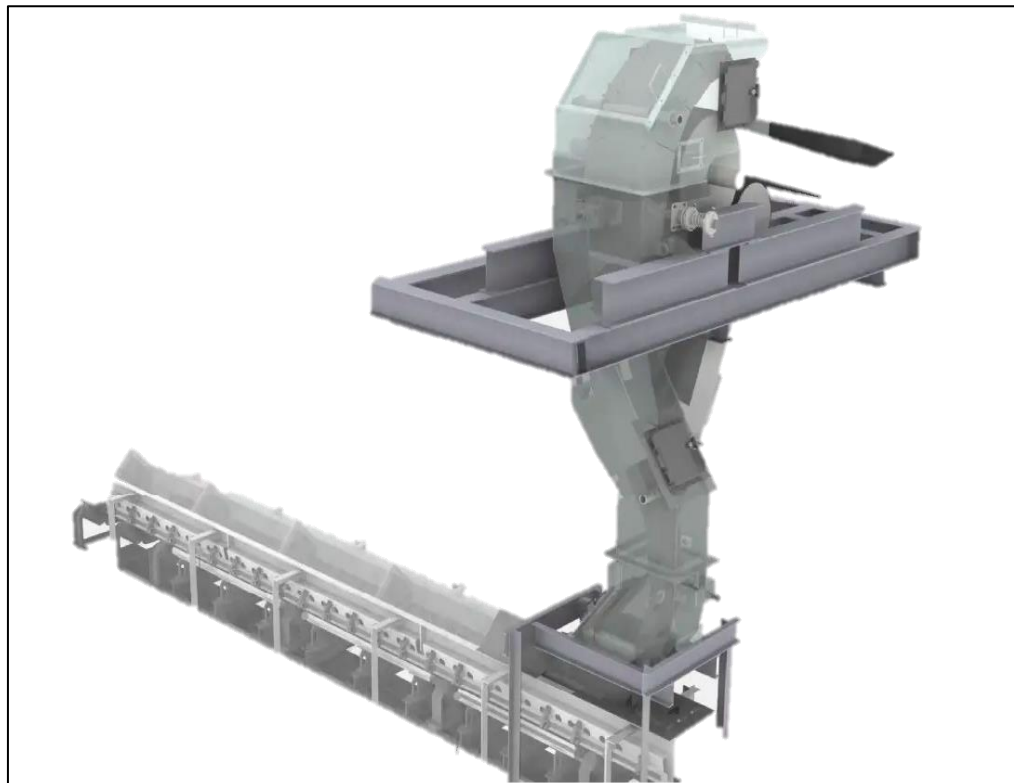
- **Inspeções Frequentes:** Verificar periodicamente a condição da correia, polias, roletes e chutes, procurando por sinais de desgaste ou desalinhamento.
- **Lubrificação Adequada:** Garantir que todos os componentes móveis, como roletes e polias, estejam adequadamente lubrificados para reduzir o atrito e o desgaste.
- **Planejamento de Manutenção Preditiva:** Implementar sensores e sistemas de monitoramento para detectar falhas iminentes, permitindo que a equipe de manutenção aja antes que ocorra uma parada inesperada.

2.3 Chutes de transferência

Os chutes de transferência (Figura 10) são componentes essenciais em sistemas de transporte de materiais a granel em diversas indústrias, especialmente na mineração. Eles atuam como pontos de transição entre correias transportadoras, garantindo que o material seja movido de uma parte do processo para outra de forma controlada e eficiente. Na mineração de bauxita, em particular, os chutes desempenham um papel crítico no transporte do minério desde sua extração até o beneficiamento. Dado o volume de material transportado e as condições severas de operação, o projeto adequado desses chutes é vital para minimizar problemas operacionais, como entupimentos e desgaste excessivo. Segundo Blazej et al. (2017), o projeto do chute é crucial para evitar desgastes excessivos e minimizar a segregação e perda de material durante o processo de transferência.

Em operações de alta abrasão, o uso de revestimentos internos de materiais resistentes ao desgaste, como cerâmica ou poliuretano, é uma prática comum para prolongar a vida útil dos chutes. Além disso, sistemas de amortecimento interno são usados para reduzir a velocidade do material durante a transferência, minimizando impactos.

Figura 10 - Modelo de chute de transferência.



Fonte: Dynamox S.A (2023)

2.3.1 Componentes do chute

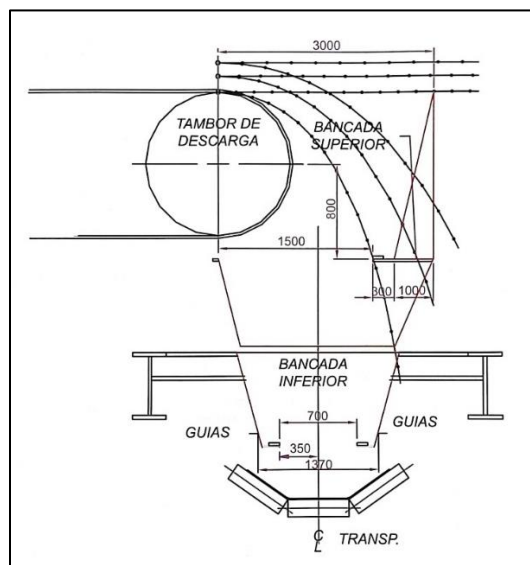
2.3.1.1 Módulos

De acordo com Gavi (2012), os chutes de transferência podem ser divididos em três módulos principais:

- Chute superior (ou bancada superior): Este módulo é o primeiro a receber o material transportado. Sua principal função é garantir que o material seja descarregado de forma controlada, minimizando o desgaste nas paredes do chute. Além disso, o chute superior é responsável por absorver o impacto inicial do material despejado pela correia, o que contribui para a longevidade da estrutura.
- Chute intermediário (ou bancada intermediária) - opcional: Sua função é guiar o material de maneira contínua e fluida para o chute inferior, sem causar obstruções. Esse módulo ajuda a evitar o entupimento e o desgaste prematuro da estrutura, garantindo que o material seja conduzido adequadamente.
- Chute inferior (ou bancada inferior): Este módulo tem a responsabilidade crucial de direcionar o material de forma correta para a correia transportadora. Segundo Gavi (2012), o material que entra pelos módulos anteriores deve ser conduzido de forma alinhada ao movimento da correia, garantindo um fluxo contínuo e evitando sobrecargas ou danos no processo de transferência.

A Figura 11 ilustra um modelo de chute que é dividido em bancadas superior e inferior.

Figura 11 - Bancadas de um chute de transferência



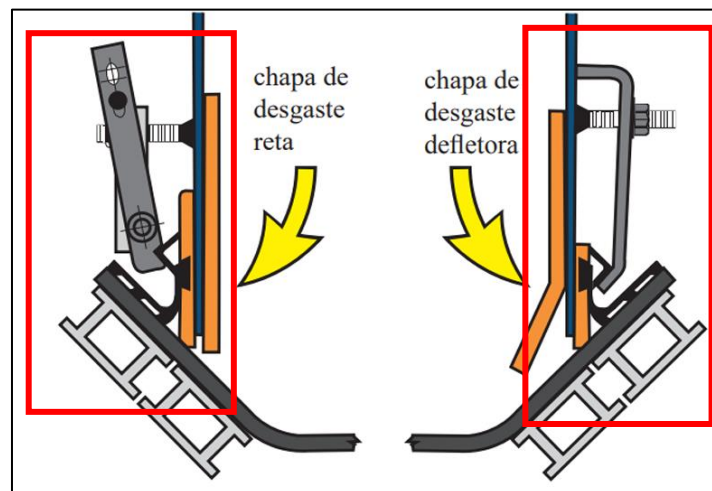
Fonte: Gavi (2012)

Essa estrutura modular visa otimizar a eficiência do transporte de material, minimizando desgastes e obstruções, além de garantir a segurança operacional do sistema de correias transportadoras.

2.3.1.2 Guias

De acordo com Gavi (2012), as guias laterais são utilizadas para reter o material na correia, depois que este deixa o chute de carregamento, até alcançar a velocidade da correia receptora, as guias são como uma extensão lateral do chute de carregamento. Uma guia dimensionada inadequadamente sempre leva a um baixo desempenho de transporte sob as formas de derramamento de material, partículas de material fugitivo, pó excessivo, e custos de operação muito mais elevados para o usuário final (Swinderman et al. 2012). A Figura 12 ilustra uma guia lateral instalada na saída de um chute de transferência.

Figura 12 - Guia lateral

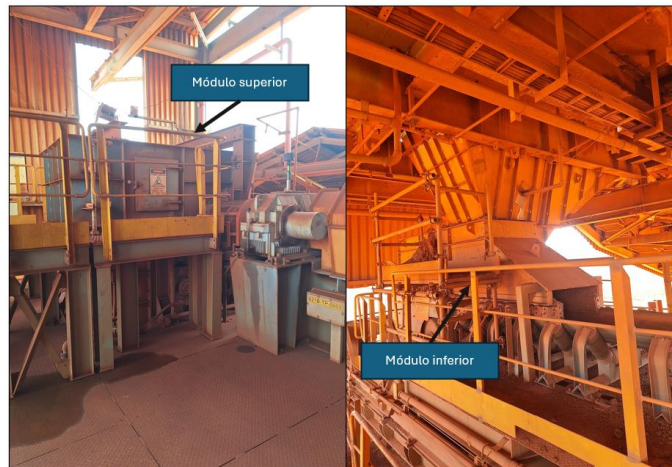


Fonte: Adaptado de Swinderman et al. (2012).

2.4 Apresentação do chute estudado

O chute escolhido para esse estudo se encontra em uma mineradora de bauxita do oeste do Pará. Este equipamento se trata de um chute que alimenta um transportador de correia móvel, que translada acima de dois silos, que alimentam a usina de beneficiamento da bauxita. A Figura 13 apresenta o sistema de transferência em questão

Figura 13 - Chute de transferência estudado



Fonte: Autoria própria (2024)

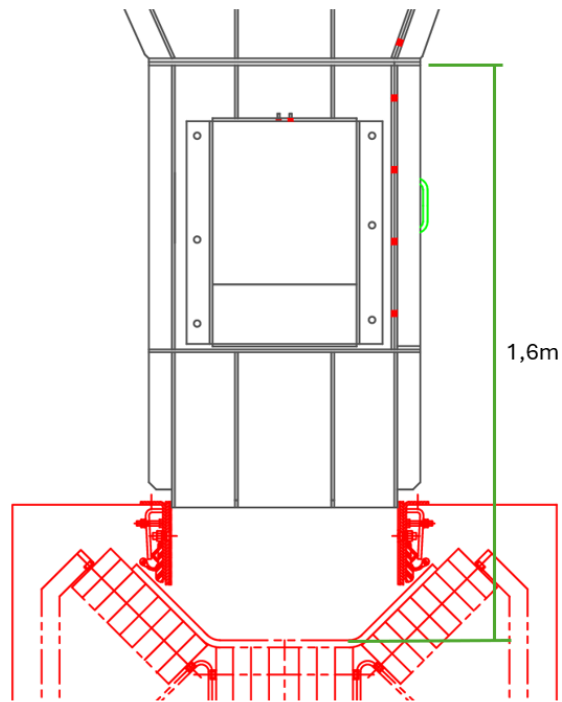
2.4.1 Problemas encontrados no chute

O transportador de correia 631B-TP-0010 e seu chute de transferência apresentam uma série de problemas que afetam o desempenho e a durabilidade do sistema. A seguir, serão detalhados os principais problemas observados tanto no chute quanto no transportador, com foco nas causas e consequências deles, e como eles se relacionam diretamente com o projeto atual do chute de transferência.

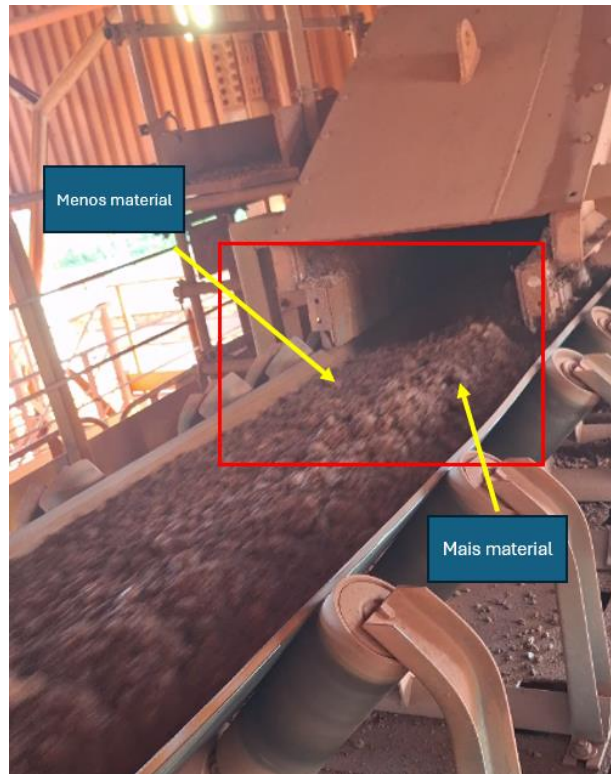
2.4.1.1 Manuseio de material

Alguns dos impactos causados pelo projeto do chute consistem em:

- **Altura de queda:** o material que sai do chute, sai a uma altura de aproximadamente 1,6 metros (Figura 14), o que gera muitos esforços sobre o transportador;
- **Alto impacto do material:** A queda livre do material, somado à altura de queda, causa um impacto acentuado na correia, o que contribui para o desgaste precoce tanto da correia quanto dos componentes associados, como os cavaletes de impacto.
- **Desalinhamento do fluxo:** O projeto do chute não manipula o material de forma eficiente, a maior parte do material tende a cair no lado esquerdo da correia considerando o sentido do fluxo (Figura 15), o que provoca problemas de desalinhamento. Isso agrava ainda mais o desgaste de certos pontos da correia, que são sobrecarregados devido à deposição desalinhada.

Figura 14 - Altura de queda do chute

Fonte: Autoria própria (2024)

Figura 15 - Material desalinhado sobre a correia

Fonte: Autoria própria (2024)

2.4.2 Problemas no transportador de correia

Um dos fatores críticos observados no transportador 631B-TP-0010 é seu comprimento curto, que acentua o desgaste da correia. Isso acontece porque o mesmo ponto da correia passa diversas vezes sob o chute, recebendo o impacto do material repetidamente no mesmo local. Como resultado:

- Desgaste concentrado: O material impacta repetidamente a mesma região da correia, acelerando o desgaste. Com o tempo, isso pode levar à necessidade de substituição precoce da correia, aumentando os custos operacionais.
- Desgaste irregular: A deposição desalinhada do material também contribui para o desgaste irregular da correia, com uma maior degradação em um dos lados.

2.4.2.1 Zona de Impacto Mal Posicionada

O material que sai do chute não cai diretamente na zona de impacto adequada, que deveria estar protegida pelos cavaletes de impacto (Figura 16). Ao invés disso, o material atinge apenas um ou poucos cavaletes, sobrecarregando-os. Isso causa vida útil reduzida dos cavaletes. A concentração de impacto em um único cavalete ou em poucos deles reduz drasticamente sua vida útil, exigindo substituições frequentes e contribuindo para paradas não planejadas.

Figura 16 - Local de queda da bauxita.

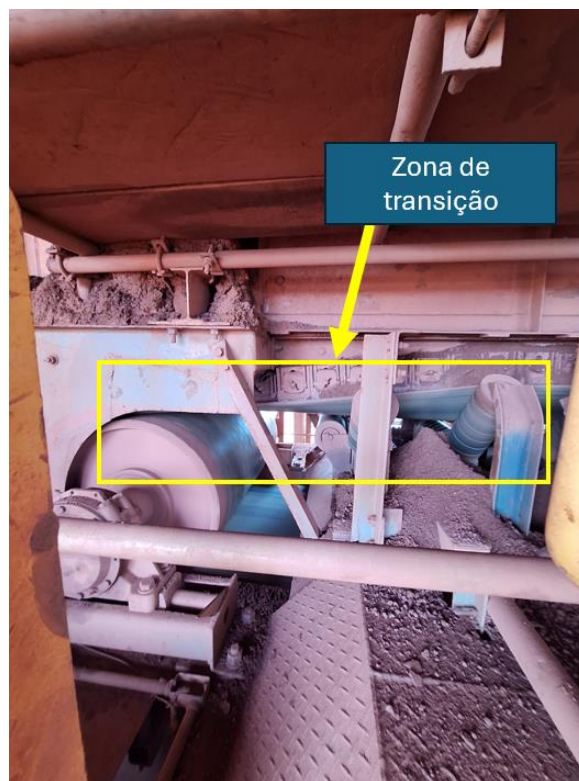


Fonte: Autoria própria (2024).

2.4.2.2 Material caindo na zona de transição

Outro problema significativo é que, devido ao comprimento curto da correia, o material ainda cai em uma região onde a correia está na sua zona de transição, ou seja, ainda não está completamente reta e estabilizada (Figura 17). Isso gera uma dificuldade no ajuste das guias laterais, pois como a correia não está perfeitamente alinhada, as guias laterais não conseguem conter o material de maneira eficiente, o que leva a um vazamento considerável de material. Esse vazamento não só causa desperdício, mas também pode gerar problemas de segurança no local de trabalho e danos ao lado de retorno da correia.

Figura 17 - Zona de transição da correia



Fonte: Autoria própria (2024).

A falta de controle adequado sobre o fluxo de material gera um vazamento considerável. Isso acontece devido à incapacidade das guias laterais de conter o material que não está sendo depositado corretamente. Esse vazamento traz impactos como o aumento na necessidade de limpeza e manutenção, pois o material vazado pode obstruir outras partes do sistema, além de representar riscos de segurança para os operadores.

2.4.3 Consequências para o Sistema e Operação

Os problemas descritos afetam não apenas o transportador e o chute, mas todo o sistema de transporte de material. Entre as principais consequências estão:

- Aumento dos custos operacionais: O desgaste acelerado dos componentes, como correia, cavaletes e guias laterais, aumenta os custos com manutenção e substituição. Este é um dos principais pontos de preocupação quanto a esse ativo.
- Redução da eficiência do sistema: A deposição desalinhada do material e o vazamento constante reduzem a eficiência do transporte, resultando em uma capacidade operacional abaixo do esperado.
- Impactos na segurança: Vazamentos de material e desgaste acentuado de componentes podem representar riscos de segurança para os trabalhadores, como escorregamentos, quedas de objetos ou falhas estruturais.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Caracterização e Propriedades do material

A caracterização do material é um dos pilares fundamentais no projeto e na análise de sistemas de transporte por correia, especialmente em aplicações industriais onde as propriedades do material transportado influenciam diretamente a eficiência operacional e a durabilidade dos componentes. Este estudo adotou uma abordagem detalhada para caracterizar propriedades mecânicas e físicas do material, utilizando ensaios amplamente reconhecidos na literatura técnica, garantindo a precisão dos parâmetros inseridos em simulações baseadas no Método dos Elementos Discretos (DEM).

A natureza dos materiais a granel, como forma, tamanho, distribuição granulométrica e comportamento mecânico, determina a interação entre o material, a correia transportadora e as paredes dos chutes de transferência. Ensaios de caracterização permitem prever padrões de fluxo, minimizar desalinhamentos e otimizar o projeto de equipamentos, alinhando-os às condições específicas de operação. Estudos como os de Ilic & Hicks (2013) e Roberts (2024) reforçam a relevância desses ensaios para calibração de modelos computacionais e validação de projetos.

Os ensaios foram realizados no laboratório do grupo de pesquisas *FluidPar*, na UFPA do campus de Tucuruí, que forneceu os recursos e disponibilizou os equipamentos necessários para a realização dos estudos. E o material usado na calibração foi uma bauxita com umidade de 5%, que não é da mineradora de bauxita que é citada neste estudo, mas pode ser usada para fazer as simulações devido à similaridade do material. Todos os ensaios foram feitos em triplicata.

3.1.1 Granulometria

O ensaio de granulometria foi realizado conforme a norma NBR 6457/86, que estabelece os procedimentos para análise granulométrica de materiais granulados. A quantidade de material utilizada no ensaio foi de 24 kg de amostra seca, em função do diâmetro máximo das partículas, que superava 50 mm.

O ensaio foi conduzido por meio de peneiramento a seco, utilizando um sistema vibratório de peneiras com aberturas padronizadas. O material foi colocado no conjunto de peneiras, e a vibração permitiu a separação das partículas em diferentes faixas granulométricas. Ao final, foi medida a quantidade de material retido em cada peneira para posterior análise.

3.1.2 Ângulo de Repouso

O ensaio de ângulo de repouso foi realizado com um cilindro sem fundo de 315 mm de diâmetro interno e 1.050 mm de comprimento, que permite a formação de uma pilha de material sobre uma bandeja giratória. O aparato experimental consistiu em:

1. Preenchimento do cilindro com 70 kg de material;
2. Elevação do cilindro a uma velocidade constante de 142 mm/s, controlada por um sistema de motorreductor e inversor de frequência;
3. Registro das imagens da pilha formada em diferentes direções (0° , 90° , 180° e 270°) para medição dos ângulos.

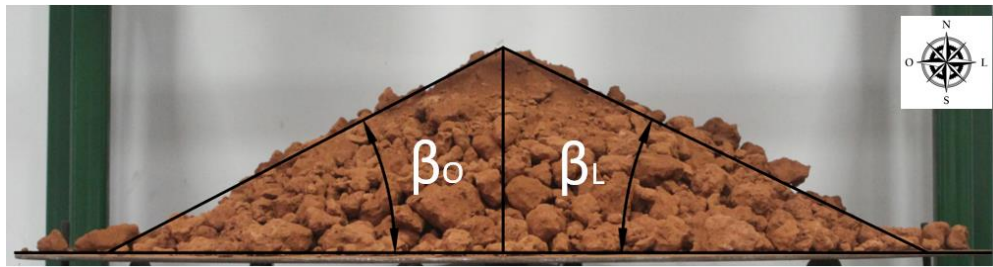
A medição do ângulo foi feita em duas direções principais (leste e oeste), permitindo determinar a média dos valores obtidos. As Figura 18 e Figura 19 ilustram o sistema e o processo de medição do ensaio.

Figura 18 - Sistema de medição do ângulo de repouso.



Fonte: Autoria própria (2024)

Figura 19 - Esquema de medição dos ângulos.



Fonte: Autoria própria (2024)

Tabela 1 - Ângulo de repouso da bauxita a 5% de umidade

	0°		90°		180°		270°		$\beta_{\text{média}}$	$\beta_{\text{desvio pad.}}$
	β_o	β_L	β_o	β_L	β_o	β_L	β_o	β_L		
Ensaio 1	29,0	29,0	28,1	31,4	28,1	27,6	30,6	29,5	28,7	1,29
Ensaio 2	29,3	28,7	28,4	29,9	27,0	28,0	29,8	28,1		
Ensaio 3	29,7	27,3	26,5	27,8	27,1	29,1	29,6	26,3		

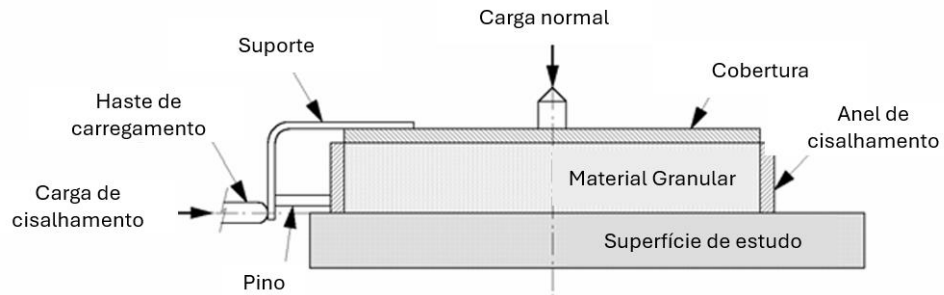
Fonte: Autoria própria (2024)

3.1.3 Atrito de Parede

O ensaio de atrito de parede foi conduzido utilizando uma Célula Jenike conforme a norma ASTM D 6128. A célula possui 95,25 mm de diâmetro e foi configurada com uma chapa de aço representando a parede do chute. O procedimento consistiu em:

1. Colocar o material, com granulometria passante de 3 mm, na célula de cisalhamento;
2. Aplicar diferentes tensões normais sobre o material;
3. Medir a tensão cisalhante necessária para o movimento do material em contato com a parede.

Esse ensaio permitiu determinar o coeficiente de atrito entre a parede de aço e o material, sendo um parâmetro crítico para projetos de chutes de transferência. Essa metodologia é bem descrita na obra de Ilic & Hicks (2013), conforme a Figura 20.

Figura 20 - Ilustração dos componentes do ensaio de célula Jenike.

Fonte: Ilic & Hicks (2013)

Tabela 2 - Resultados das tensões do experimento

<i>Massa [kg]</i>	<i>Ensaio 1 [kg]</i>	<i>Ensaio 2 [kg]</i>	<i>Ensaio 3 [kg]</i>	<i>Tensão Normal [kPa]</i>	<i>Tensão Cisalhante [kPa]</i>	<i>Ângulo de Atrito com a Parede [graus]</i>	<i>Coefficiente de Atrito [-]</i>
5	2,80	2,87	2,89	6,88	3,92	28,3	0,54
4	2,45	2,51	2,40	5,51	3,37		
3	1,92	1,99	1,81	4,13	2,62		
2	1,41	1,48	1,32	2,75	1,93		
1	0,80	0,84	0,73	1,38	1,09		
0	0,17	0,18	0,19	0,00	0,24		

Fonte: Autoria própria (2024)

3.1.4 escoabilidade em Caixa de Fluxo

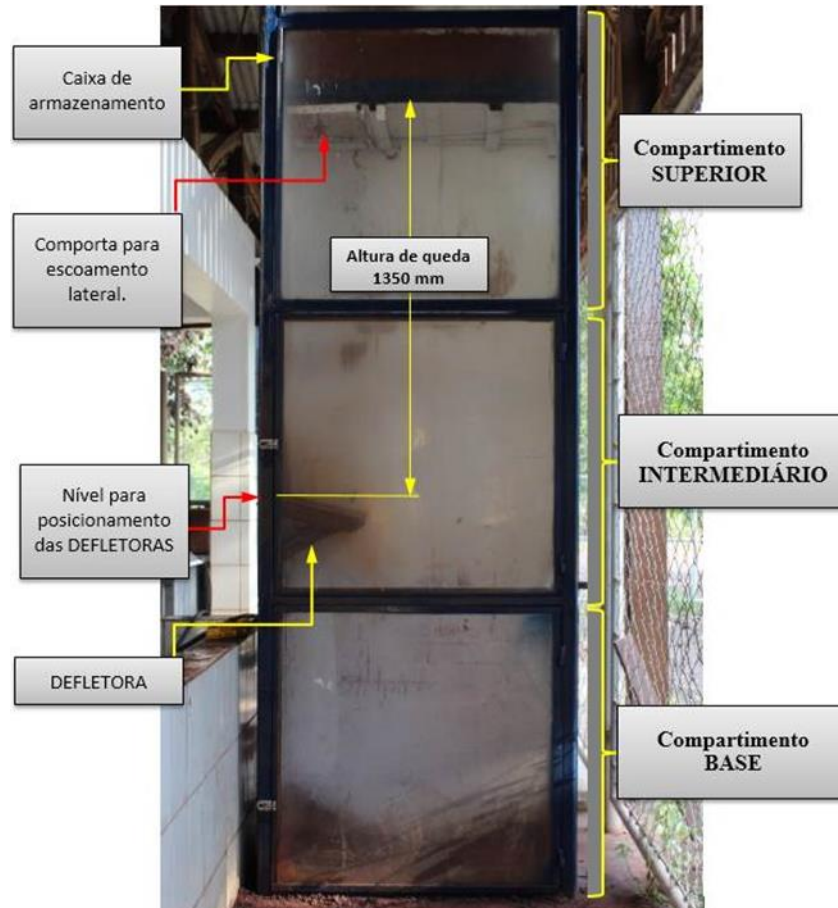
O ensaio de escoabilidade em caixa de fluxo foi realizado utilizando uma estrutura de 3.000 mm de altura, com seção transversal de 500 mm x 1.000 mm. Para otimização do ensaio, uma divisória foi introduzida na caixa para adequação da quantidade de material.

O procedimento foi conduzido em seis etapas:

1. Armazenamento do material na caixa de armazenamento;
2. Nivelamento do material em uma altura de 280 mm;
3. Elevação da caixa até a posição de ensaio;

4. Posicionamento das defletoras a 90° e 105°;
5. Abertura da comporta lateral;
6. Registro do escoamento por imagens.

Figura 21 - Caixa de fluxo utilizada nos ensaios de escoabilidade.



Fonte: Autoria própria (2024)

3.1.5 Atrito Material-Material (Cisalhamento Direto)

Os ensaios de cisalhamento direto foram realizados em uma Célula Jenike, visando determinar:

- O ângulo de atrito interno (φ);
- A coesão do material;
- O comportamento de escoamento do material granulado.

O procedimento consistiu em aplicar uma tensão normal de consolidação e medir a tensão cisalhante limite para o movimento do material. A partir dos resultados, foram obtidos

os parâmetros de atrito interno e a classificação qualitativa do comportamento de escoamento do material. A Figura 22 ilustra a bancada utilizada no ensaio.

Figura 22 - Célula Jenike empregada ao ensaio de atrito entre partículas.



Fonte: Autoria própria (2024)

3.2 Simulação DEM

A técnica computacional de simulação por Elementos Discretos (DEM, do inglês *Discrete Element Method*) foi inicialmente desenvolvida para modelar materiais granulados e processos de fragmentação, sendo amplamente utilizada no setor de mineração. Sua habilidade em representar partículas individuais possibilita uma análise detalhada do comportamento de sólidos em sistemas complexos, como chutes de transferência, transportadores de correia e britadores. A DEM permite prever problemas relacionados ao desgaste, fluxo e transporte de materiais, otimizando processos e aumentando a eficiência operacional.

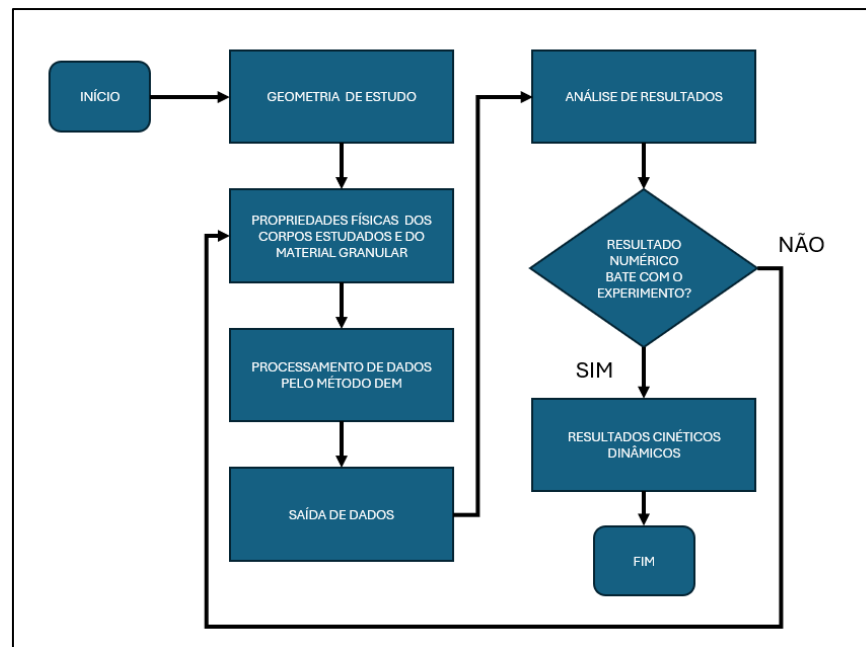
O método dos elementos discretos (DEM) foi desenvolvido no início da década de 1970 com o objetivo de analisar problemas relacionados à mecânica das rochas e dos solos (Cundall e Strack, 1979 apud Hastie 2010). Segundo Hastie (2010), o método envolve determinar a dinâmica individual de todas as partículas em um determinado conjunto, primeiro determinando as forças totais que atuam em cada partícula e, em seguida, aplicando a 2ª lei do movimento de Newton. Isso produzirá a velocidade e o deslocamento de cada partícula e, equilibrando o momento angular de cada partícula, a rotação pode ser determinada.

O método DEM se destaca pela habilidade de lidar com a complexidade nas interações entre partículas, como forças de contato, atrito, impacto, entre outras, e possibilita a execução de cálculos e iterações que podem ser visualizados. Isso faz dele uma ferramenta robusta para a análise de sistemas compostos por materiais granulares.

3.2.1 Software de simulação DEM

O software *Bulk Flow Analyst*TM (BFA), desenvolvido pela *Overland Conveyor Company*, é uma ferramenta projetada para modelar o escoamento de partículas usando o método numérico DEM. Ele é aplicado para simular o movimento de partículas sólidas em ambientes fluidizados, como em transportadores de correia, chutes de transferência, entre outros. O BFA é especialmente valioso para analisar problemas relacionados ao fluxo de partículas em ambientes industriais, auxiliando no projeto de chutes e silos, dimensionamento de equipamentos, otimização de processos e solução de questões como o entupimento ou desalinhamento de correias.

Figura 23 - Fluxograma de processo do BFA



Fonte: Autoria própria (2024).

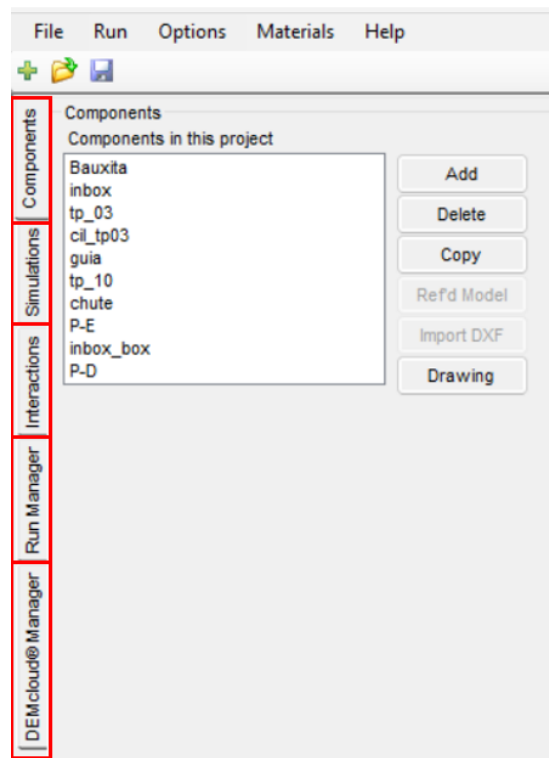
O software permite simulações em tempo real, o que facilita a visualização de operações e a detecção de pontos críticos. O BFA segue três etapas lógicas fundamentais: entrada de

dados, processamento e saída de dados. A entrada de dados inclui a geometria e propriedades do material granular, o processamento ocorre pelo método DEM, e os resultados de saída são então comparados aos dados experimentais. Caso os dados estejam de acordo, obtêm-se parâmetros de calibração cinéticos e dinâmicos do material e da geometria de contato do material granular. Se os dados não forem satisfatórios, ajusta-se as propriedades do material e reinicia-se o processo. O fluxograma deste processo é mostrado na Figura 23.

Para calibrar o material, o software possibilita ajustes em alguns dos parâmetros do modelo numérico, incluindo: o coeficiente de atrito entre partículas (*Interparticle Friction*), o coeficiente de coesão entre partículas (*Interparticle Cohesion*), o coeficiente de adesão das partículas à superfície (*Particle Surface Adhesion*) e o coeficiente de atrito com as paredes (*Wall Friction*). A calibração do modelo numérico é feita por meio de testes de visualização do fluxo do material granulado em uma caixa de fluxo.

A Figura 24 mostra a tela principal do software, onde são apresentadas as janelas principais: componentes (*Components*), simulações (*Simulations*), interações (*Interactions*), gerente de execução (*Run Manager*) e o gerenciador da conta DEM (*DEMcloud™ Manager*).

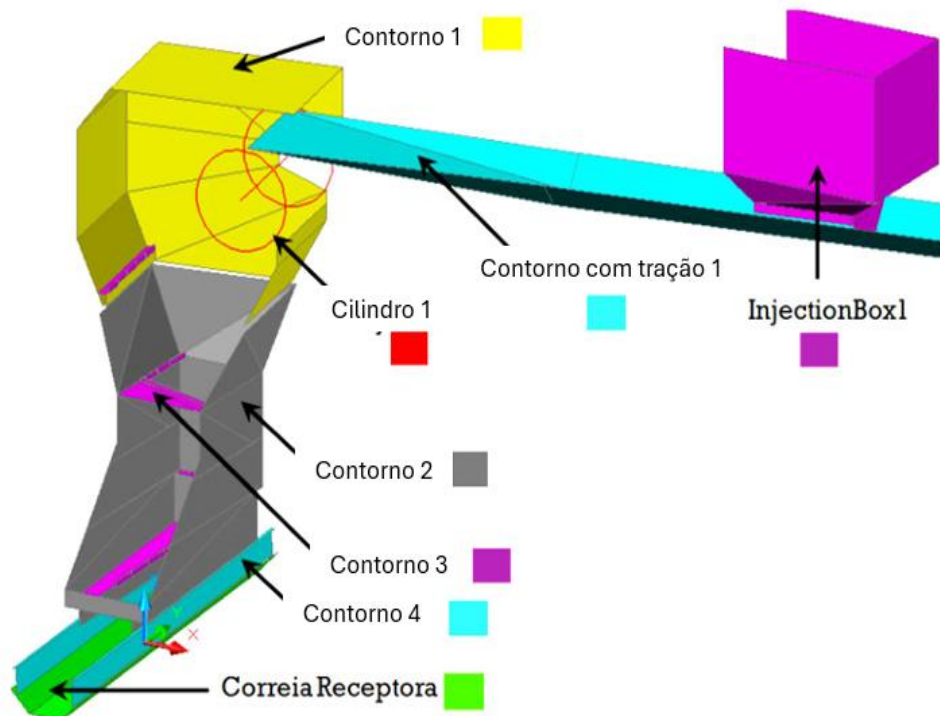
Figura 24 - Tela principal do BFA.



Fonte: Adaptado de Overland Conveyor Company (2014).

A Figura 24 também mostra o software aberto na aba denominada *Components*. Onde são listados os elementos do projeto, incluindo o material e a geometria do chute. A geometria do chute compreende as superfícies internas do chute (*Boundary*), a caixa de alimentação (*InjectionBox*), a correia transportadora de descarga (*BoundaryWTraction*), o cilindro motriz (*Cylinder*) e a correia receptora. As seções que entram em contato com o material precisam ser devidamente seccionadas. A Figura 25 exemplifica como o software reconhece a geometria básica de um sistema de transferência.

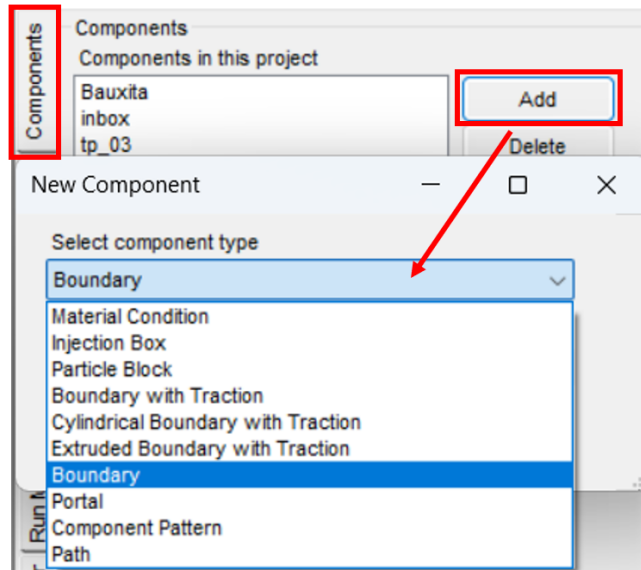
Figura 25 - Distribuição de componentes no BFA



Fonte: Adaptado de Rocha e Macias (2012).

Ainda na janela *Components*, são adicionados (*Add*) os dados dos componentes para a simulação, conforme ilustrado na Figura 26. Nessa aba, são inseridas as informações do material (*Material Condition*), incluindo a massa específica aparente (*Bulk Density*) em kg/m^3 , o coeficiente de atrito entre partículas (*Interparticle Friction*), o coeficiente de coesão entre partículas (*Interparticle Cohesion*) e o raio das partículas finas (*Radius of Fine*), em milímetros. Além disso, nessa janela, são adicionados os demais componentes conforme mostrado anteriormente.

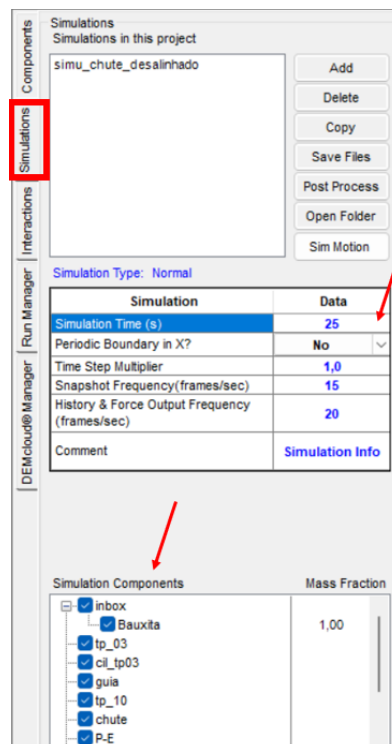
Figura 26 - Inserção de componentes na aba "components".



Fonte: Adaptado de Overland Conveyor Company (2014).

Na aba “*simulations*”, apresentado na Figura 27 é responsável por possibilitar diferentes simulações baseadas no mesmo modelo criado na aba “*components*”. É nesta aba que são escolhidos os componentes que farão parte da simulação e o tempo de simulação desejado.

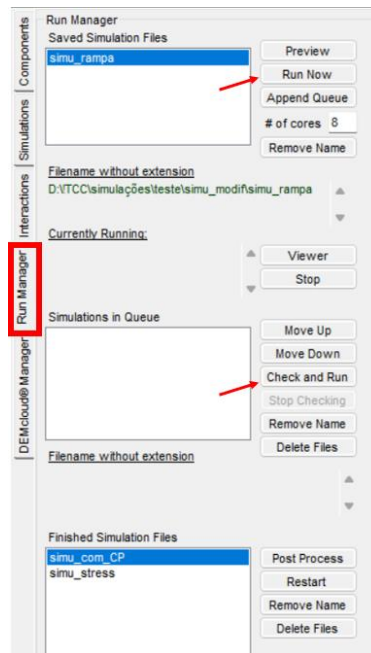
Figura 27 - Conteúdo da aba "simulations"



Fonte: Adaptado de Overland Conveyor Company (2014).

Na guia “*Run Manager*” (gerenciador de execução), são iniciadas as simulações criadas na guia “*simulations*”, nesta etapa do processo, é possível também verificar e executar a simulação. A Figura 28 ilustra a janela referente a guia “*Run Manager*”.

Figura 28 - Conteúdo da aba "Run Manager"



Fonte: Adaptado de Overland Conveyor Company (2014).

3.2.2 Calibração do modelo numérico

A calibração do modelo numérico foi realizada com base nos resultados experimentais obtidos nos ensaios descritos no tópico 2.5, com foco nos parâmetros relevantes para a simulação do escoamento de bauxita via Método dos Elementos Discretos (DEM).

O software permite ajustar os parâmetros de interação entre partículas e entre partículas e superfícies, garantindo que o comportamento numérico reproduza as condições experimentais.

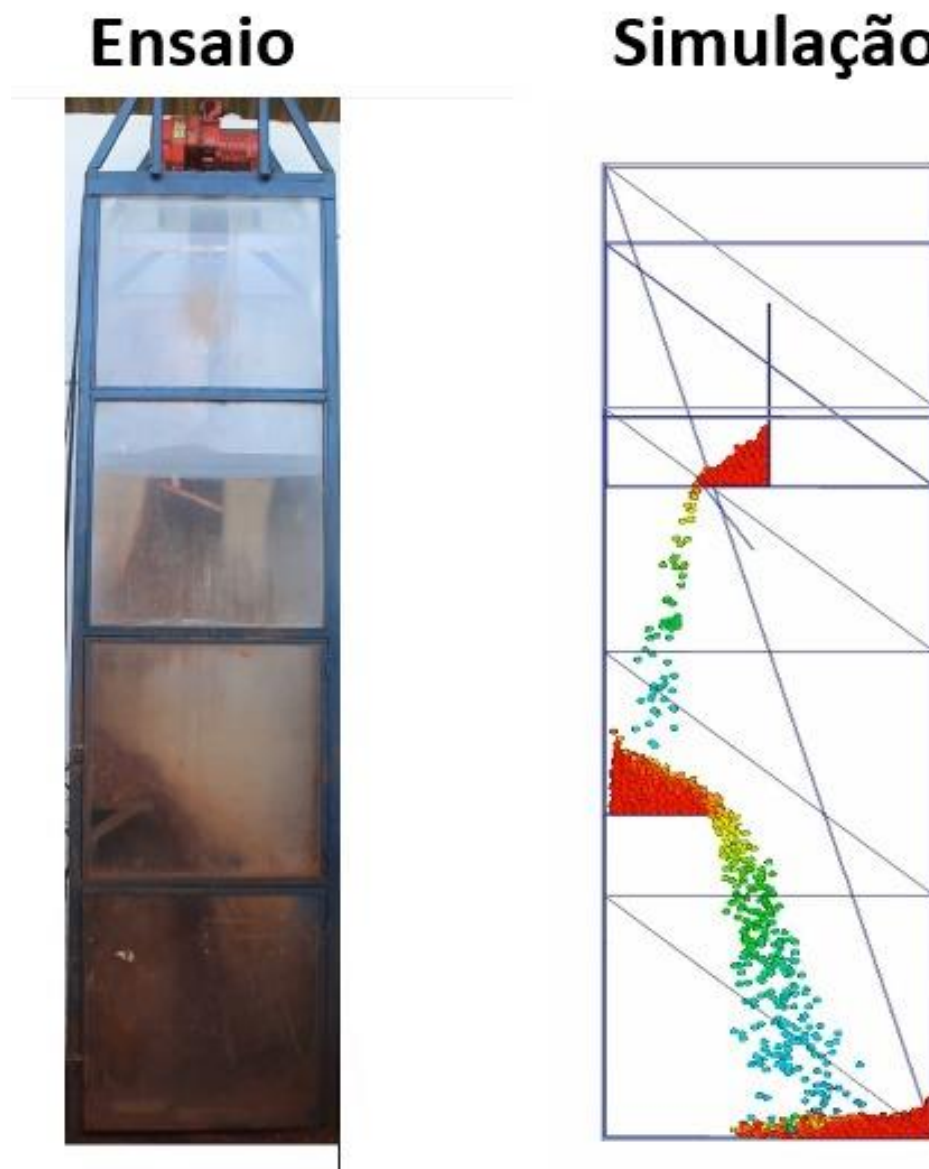
A calibração precisa do modelo numérico é essencial para garantir a representatividade do comportamento do material no chute de transferência. O ajuste iterativo dos parâmetros permitiu reproduzir o fluxo de material observado experimentalmente, possibilitando a identificação das forças atuantes e do padrão de escoamento.

3.2.2.1 Procedimento de Calibração

A calibração foi conduzida de forma iterativa, com o intuito de replicar os resultados obtidos nos ensaios de escoabilidade em caixa de fluxo e ângulo de repouso. O processo consistiu em:

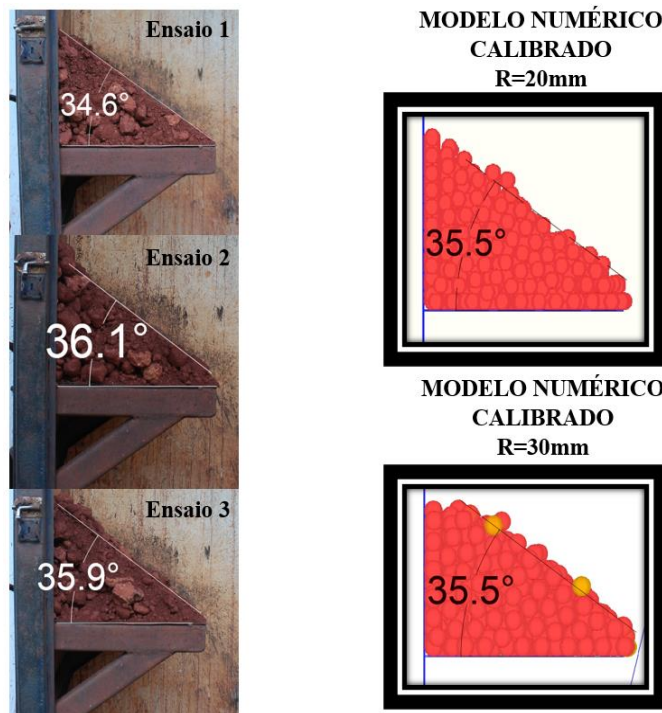
1. Definição inicial dos parâmetros de entrada;
2. Simulação do comportamento observado experimentalmente;
3. Ajuste e validação dos resultados obtidos.

Figura 29 - Comparação entre ensaio na caixa de fluxo e modelo numérico



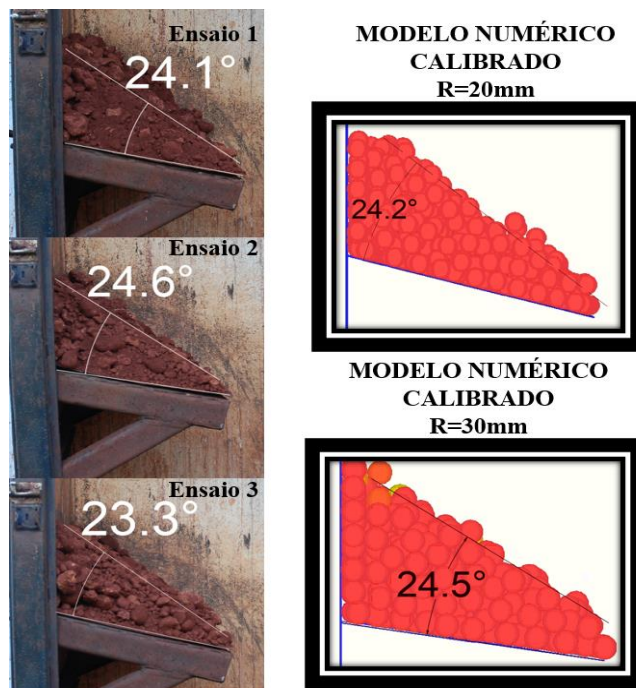
Fonte: Autoria própria (2024)

Figura 30 - Resultado da calibração do modelo numérico comparado ao ensaio experimental para defletora de 90°



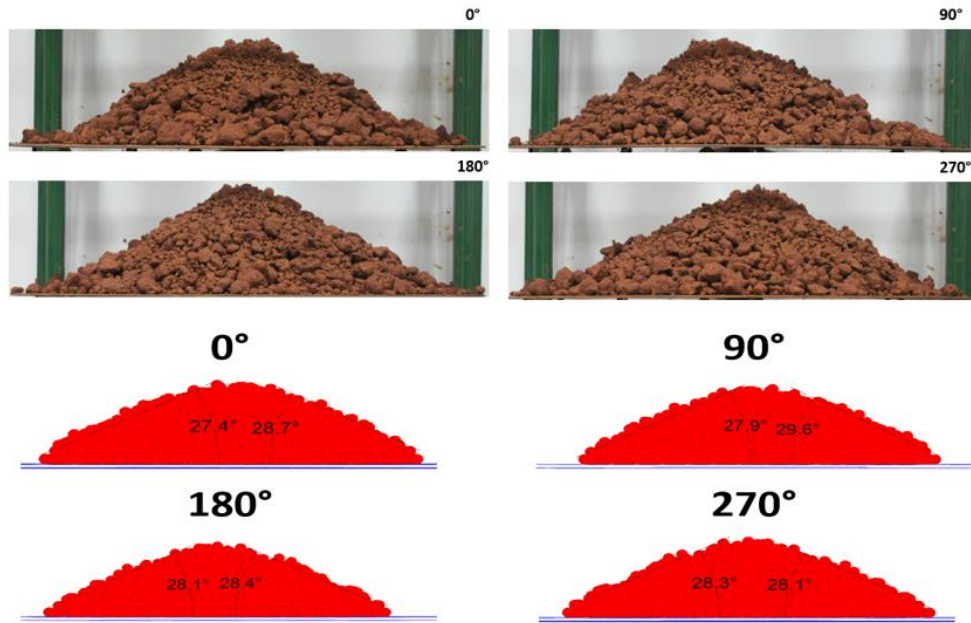
Fonte: Autoria própria (2024)

Tabela 3 - Resultado da calibração do modelo numérico comparado ao ensaio experimental para defletora de 105°



Fonte: Autoria própria (2024)

Tabela 4 - Comparação entre os ângulos de repouso dos ensaios experimental e numérico.



Fonte: Autoria própria (2024)

3.2.2.2 Parâmetros Calibrados

Os principais parâmetros utilizados na calibração do modelo DEM foram ajustados conforme apresentado na Tabela 1:

Tabela 5 - Resultados da caracterização do material

PARÂMETROS DE CALIBRAÇÃO			
Interação Partícula – Superfície	Wall Friction	0.54	0.54
	Normal Contact Restitution	0.2	0.2
	Rotating Friction	0.2	0.2
	Particle-Surface Adhesion	0.001 25	0.001 25
	Interação Partícula – Partícula	Interparticle friction	0.215
	Normal contact restitution	0.20	0.2
	Rotating Friction	0.05	0.01

Raio da partícula (mm)	20	30
Interparticle Cohesion Coefficient	0.015	0.046
Radius of fine	0.68	0.69
Bulk Density (kg/m ³)	1309	1309
Packing Ratio	1.86	1.86

Fonte: Autorial própria (2024)

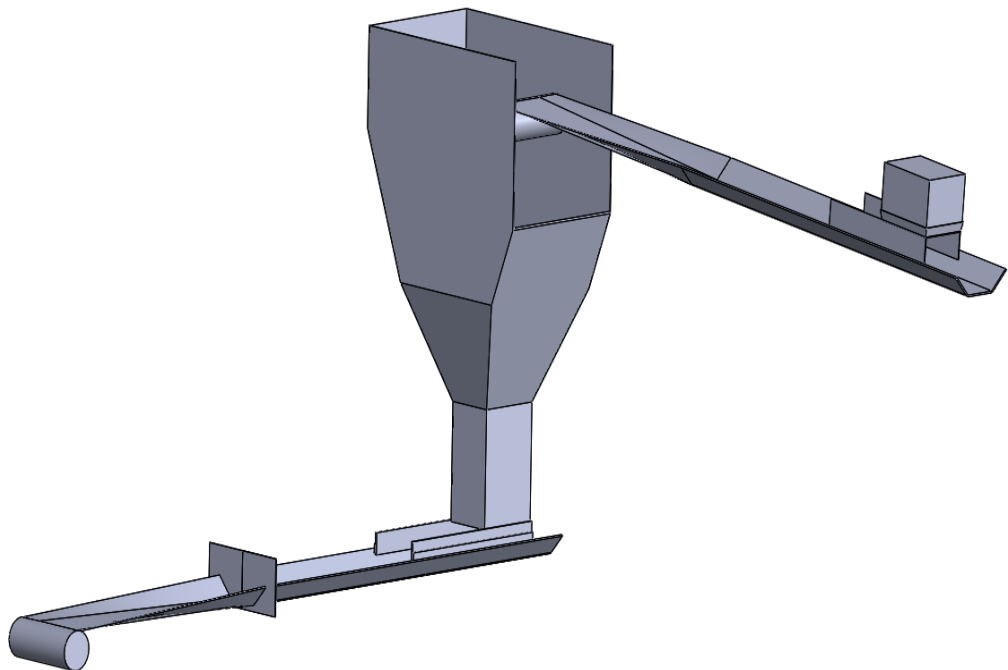
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção, são apresentados os resultados das simulações realizadas para o chute de transferência de uma mineradora de bauxita, seguidas de uma discussão detalhada sobre os efeitos das modificações propostas no projeto. O estudo baseou-se em simulações pelo Método dos Elementos Discretos (DEM), permitindo uma análise detalhada do fluxo de material, das tensões aplicadas à correia transportadora e do desalinhamento resultante. As simulações foram realizadas em duas etapas: (1) simulação do projeto atual e (2) simulação do projeto modificado.

4.1 Simulação do Projeto Atual do Chute

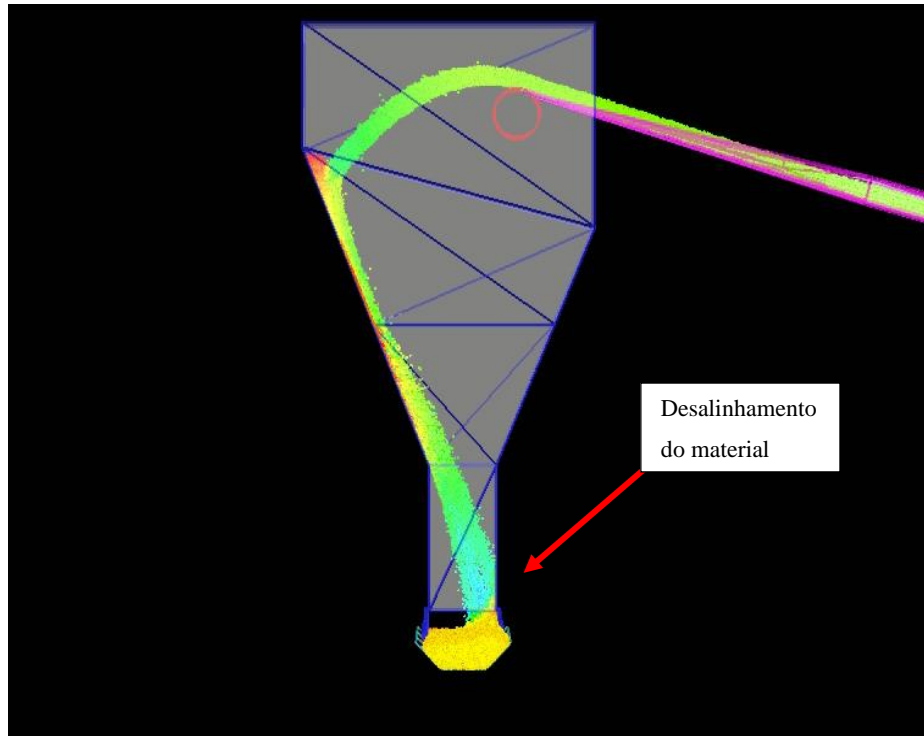
No projeto atual, o chute foi modelado em CAD para garantir precisão na representação das condições reais de operação, conforme ilustra a Figura 31. A simulação DEM identificou que o fluxo de material gera um desalinhamento significativo na correia transportadora, o que confirma o que foi visto na Figura 15. As Figura 32 e Figura 33 ilustram as imagens da simulação.

Figura 31 - Desenho CAD do sistema de transferência do 631B-TP-0010



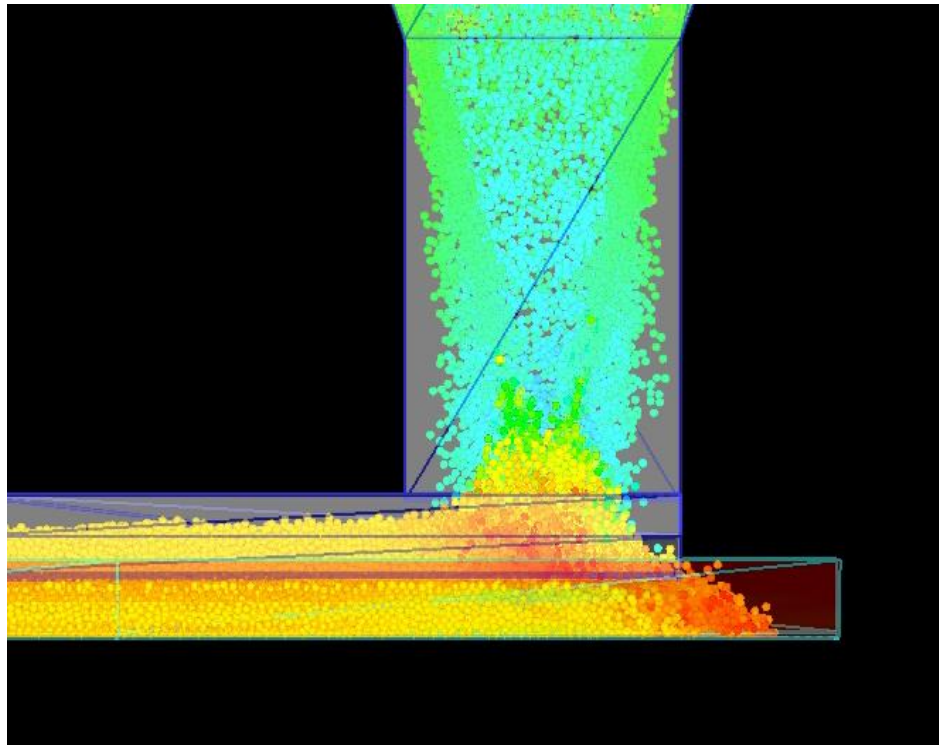
Fonte: Autoria própria (2024)

Figura 32 - Vista frontal da simulação



Fonte: Autoria própria (2024)

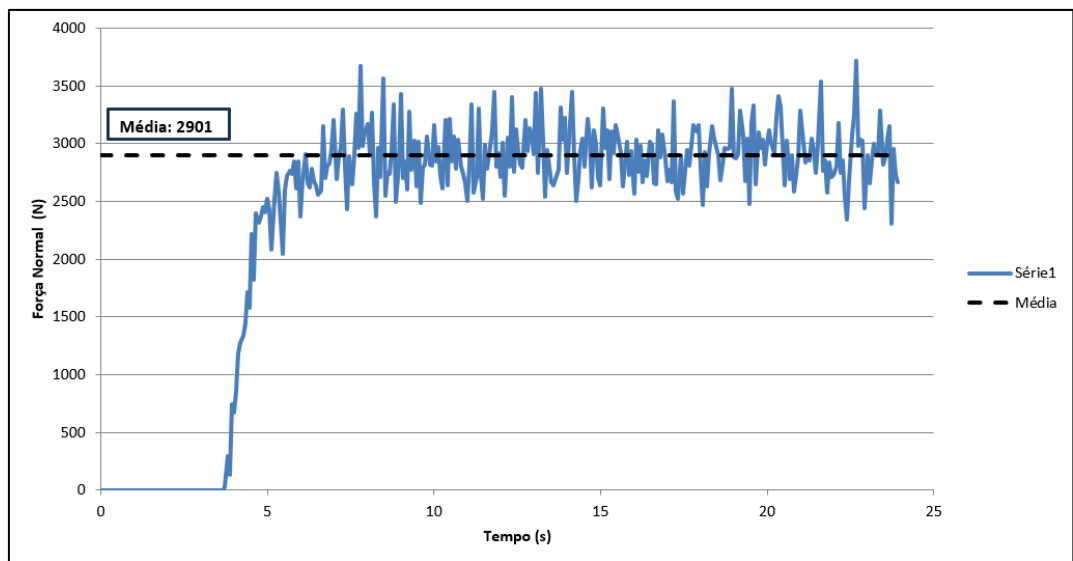
Figura 33 - Vista lateral da simulação do chute



Fonte: Autoria própria (2024)

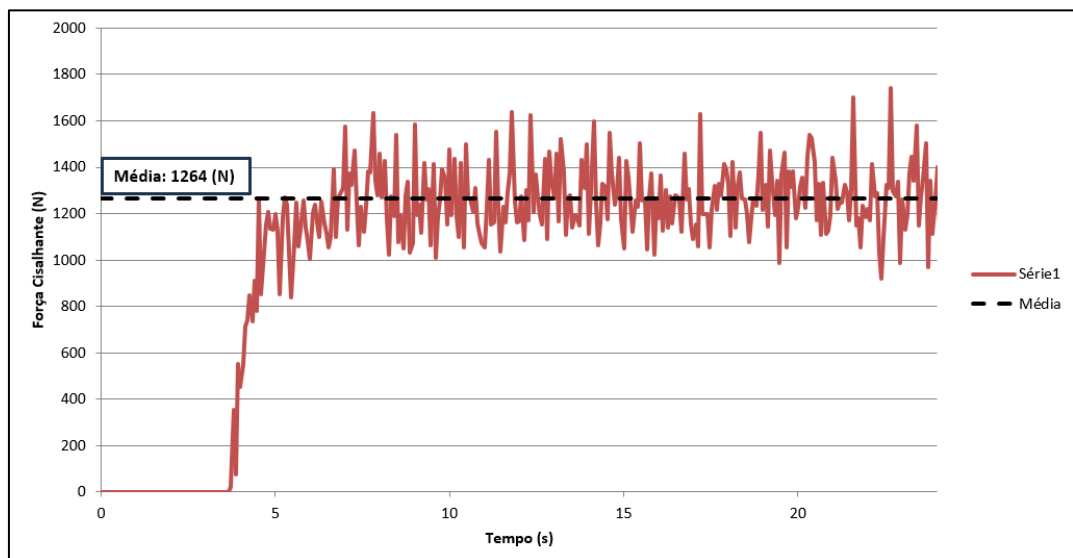
Com base nas simulações, foram obtidas também as tensões normais e cisalhantes na correia. Tensões elevadas indicam que o chute pode estar impactando negativamente na durabilidade da correia transportadora, aumentando a necessidade de manutenção e reduzindo a eficiência do sistema. O desalinhamento do material ao longo da correia foi identificado como um dos principais fatores de desgaste irregular na correia, o que pode gerar interrupções na operação para ajustes de guia.

Figura 34 - Esforços normais aplicados na correia transportadora - Atual.



Fonte: Autoria própria (2024)

Figura 35- Esforços cisalhantes aplicados na correia transportadora - Atual.



Fonte: Autoria própria (2024)

Esses resultados vão servir como comparação para os resultados com o chute modificado. Baseado nesses resultados será possível ver se houve melhoria nas características dos esforços aplicados na correia transportadora.

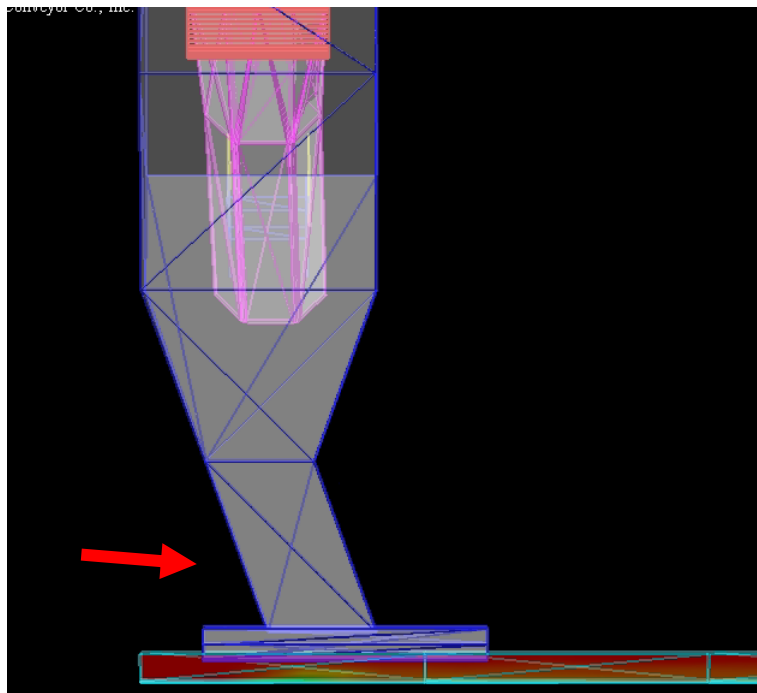
4.2 Modificações no Projeto do Chute e Novas Simulações

Para mitigar os problemas observados, foram propostas as seguintes modificações no projeto do chute:

- Aumento da Rampa de Queda: A extensão da rampa foi aumentada para minimizar a altura de queda do material, o que reduz o impacto e direciona o fluxo no sentido da correia, conforme ilustra a Figura 36.
- Instalação de uma Defletora: Adicionou-se uma defletora no módulo inferior para alinhar o fluxo do material e reduzir o desalinhamento lateral, conforme ilustra a Figura 37.

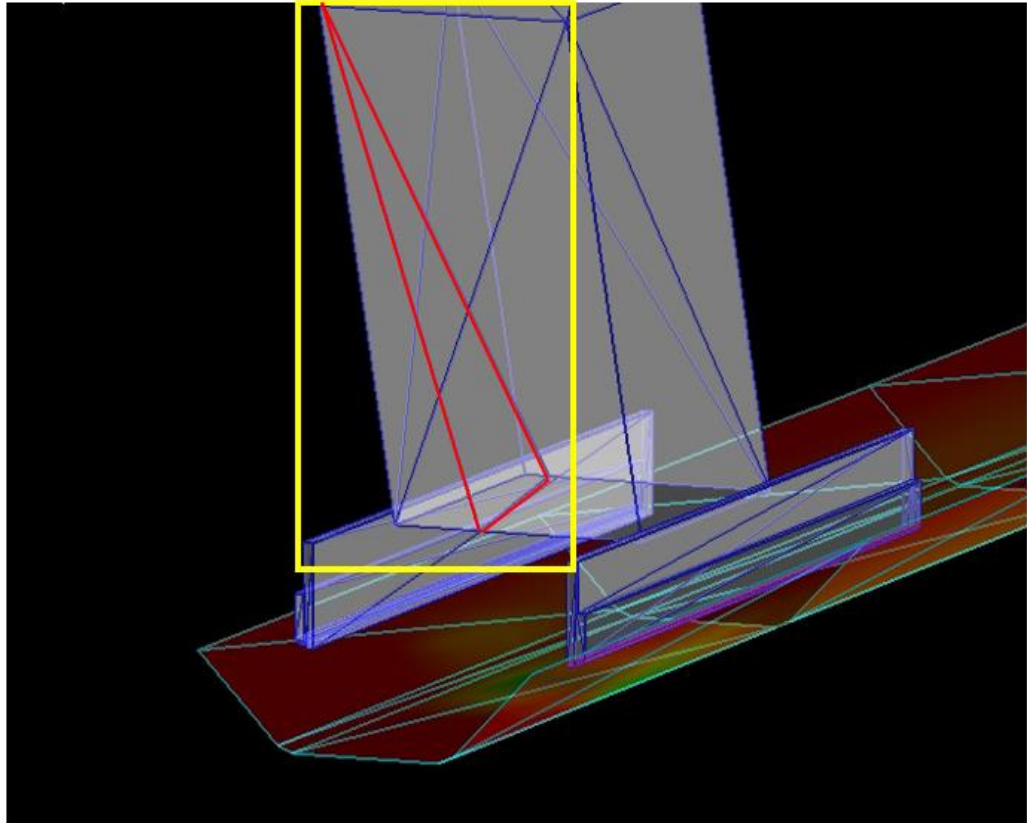
Essas modificações foram modeladas em CAD e, posteriormente, o novo projeto foi submetido a uma segunda rodada de simulações DEM, a Figura 38 e Figura 39 ilustram os resultados.

Figura 36 - Extensão da rampa do chute (vista lateral).



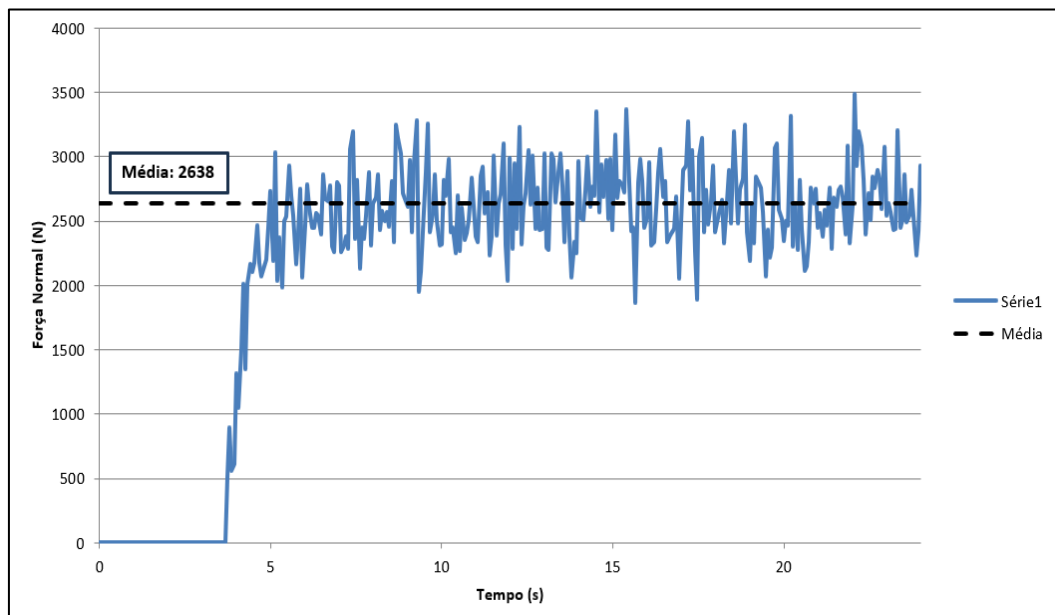
Fonte: Autoria própria (2024)

Figura 37 - Instalação da defletora no módulo inferior.



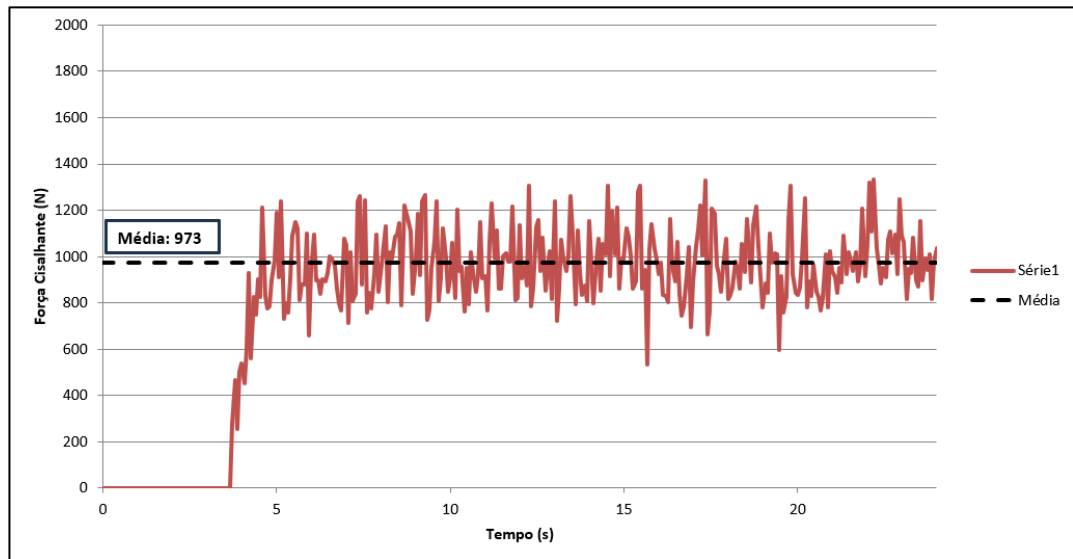
Fonte: Autoria própria (2024)

Figura 38 - Esforços normais na correia (chute modificado).



Fonte: Autoria própria (2024)

Figura 39 - Esforços cisalhantes aplicados na correia (chute modificado)

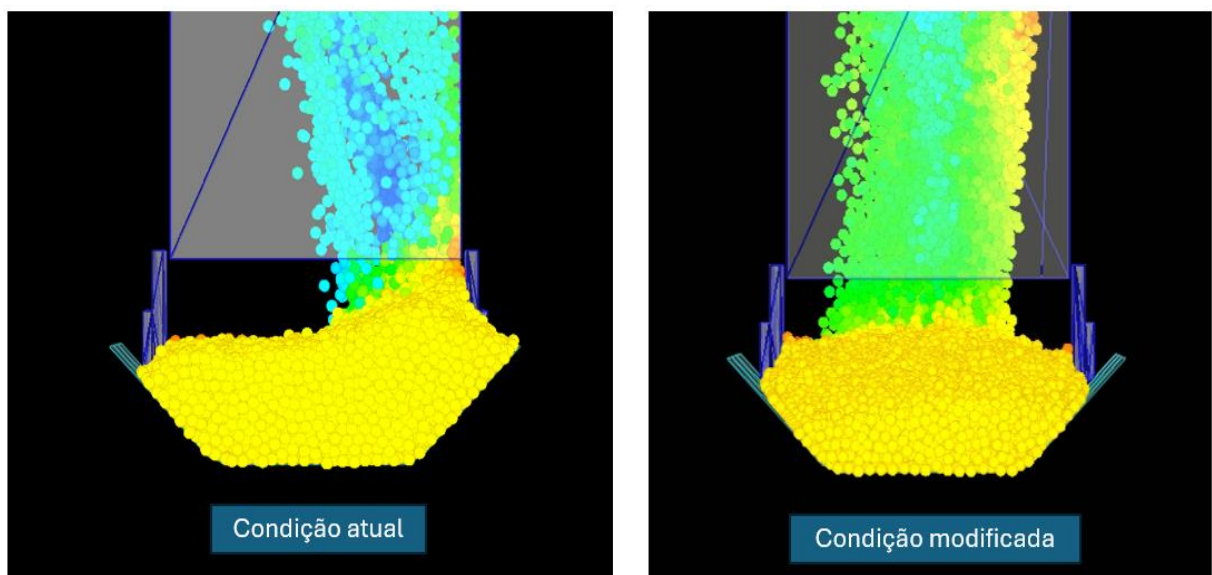


Fonte: Autoria própria (2024)

Os resultados dos esforços após a modificação do chute serão comparados com os dados retirados do projeto atual. De início, já é possível observar uma redução nos esforços, essas informações são mais desenvolvidas posteriormente durante as discussões dos resultados.

4.2.1 Análise do Desalinhamento

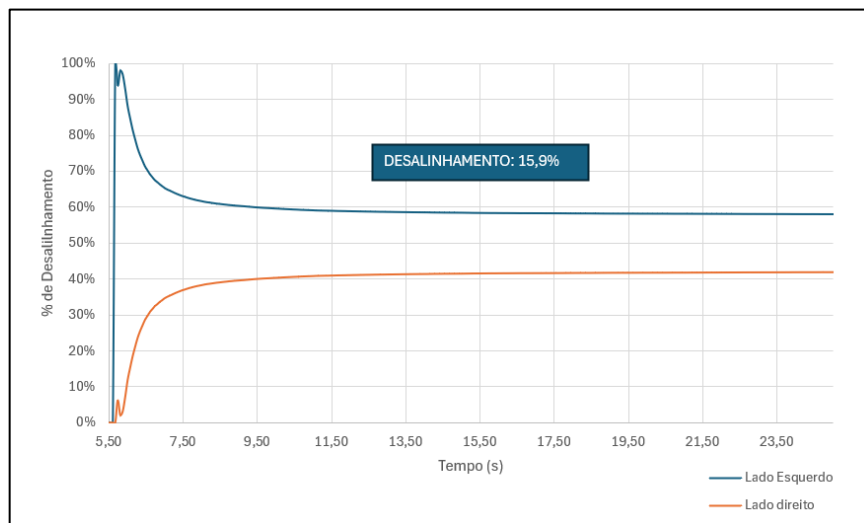
Figura 40 - Comparação entre o desalinhamento Atual x Modificado.



Fonte: Autoria própria (2024).

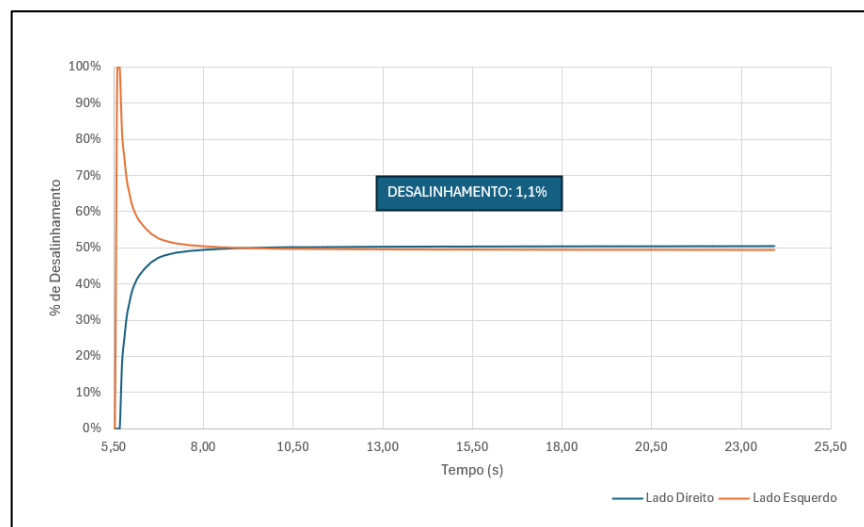
A defletora provou-se eficaz para realinhar o fluxo de material, reduzindo o desalinhamento ao longo da correia transportadora, conforme a Figura 40. Esse alinhamento mais uniforme do fluxo contribui para um desgaste mais homogêneo, minimizando a necessidade de manutenção frequente. As Figura 41 e Figura 42 ilustram o desalinhamento de ambos os projetos, as linhas indicam a quantidade de material em cada lado da correia, o ponto ideal para o projeto é que as duas linhas fiquem sobrepostas ao centro do gráfico, isso indicaria um alinhamento perfeito da correia.

Figura 41 - Desalinhamento do projeto atual



Fonte: Autoria própria

Figura 42 - Desalinhamento do novo projeto



Fonte: Autoria própria

4.3 Comparação Quantitativa dos Resultados

As simulações do chute modificado mostraram uma redução tanto nas tensões normais quanto nas tensões de cisalhamento na correia. A nova configuração da rampa de queda permitiu que o material fosse entregue com menor impacto, enquanto a defletora redirecionou o fluxo de modo a reduzir o desalinhamento.

Para consolidar a análise, a Tabela 6 mostra as diferenças dos esforços entre o projeto atual e o projeto modificado.

Os resultados demonstram que a modificação do chute proporcionou uma redução nos valores de esforços máximos e médios. Especificamente, nos esforços normais, observou-se uma diminuição de aproximadamente 8% no valor médio. Quanto aos esforços cisalhantes, a redução foi ainda mais expressiva, com uma diminuição de 23% no valor médio.

Tabela 6 - Resultados dos esforços atuantes na correia.

	Esforço médio (N)
Forças Normais (atual)	2901
Forças Normais (Modificado)	2638
Forças Cisalhantes (atual)	1264
Forças Cisalhantes (Modificado)	973

Fonte: Autoria própria (2024).

4.4 Discussão dos Resultados

As modificações realizadas no chute de transferência mostraram impactos positivos tanto na eficiência do transporte de material quanto na durabilidade do sistema. A análise comparativa entre o projeto atual e o modificado revelou uma redução nos esforços normais e cisalhantes aplicados à correia transportadora, bem como melhorias no alinhamento do fluxo de material.

4.4.1 Impacto nas Tensões Aplicadas

Os esforços normais e cisalhantes, antes elevados, foram reduzidos consideravelmente após a simulação do novo projeto do chute. O aumento da rampa do chute contribuiu para diminuir a altura de queda do material, reduzindo o efeito direto sobre a correia. A inclusão da

defletora realinhou o fluxo do material, redistribuindo uniformemente as cargas aplicadas à superfície da correia.

Os valores quantitativos indicam uma redução de 8% no esforço médio. Para os esforços cisalhantes, a diminuição foi ainda mais acentuada, com uma redução de 23% no valor médio. Esses resultados destacam a eficácia das modificações e apontam para uma significativa melhora na distribuição das forças ao longo da correia.

4.4.2 Alinhamento do Fluxo de Material

O desalinhamento do material, identificado como um dos principais fatores de perda de material no projeto atual, foi mitigado pela inclusão da defletora. O realinhamento do fluxo resulta em um desgaste mais homogêneo da correia, reduzindo a necessidade de ajustes frequentes nas guias laterais. Essa melhoria impacta diretamente na redução de paradas não planejadas e no aumento da eficiência operacional do sistema.

Tabela 7 - Comparação entre os desalinhamentos do projeto atual e o modificado

	Projeto Atual	Projeto modificado
Desalinhamento	15,9 %	1,1%

Fonte: Autoria própria (2024)

4.4.3 Implicações na Durabilidade da Correia e nos Custos Operacionais

A redução nos esforços aplicados à correia transportadora reflete diretamente na sua vida útil. Com menores tensões normais e cisalhantes, espera-se uma diminuição na frequência de substituição da correia e dos cavaletes de impacto. Esse aumento na durabilidade dos componentes resulta em uma economia significativa nos custos operacionais, incluindo manutenção corretiva e aquisição de peças sobressalentes.

Além disso, a redistribuição do fluxo de material minimizou a sobrecarga em pontos específicos da correia, o que anteriormente contribuía para desgastes localizados. Essa uniformidade no desgaste promove um transporte mais confiável e eficiente.

Os resultados obtidos neste estudo corroboram com a literatura existente sobre modificações em chutes de transferência. Doroszuk et al. (2021) destacam que ajustes geométricos, como a instalação de defletores e o alongamento de rampas, são estratégias

eficazes para reduzir tensões e melhorar o alinhamento do fluxo em sistemas de transporte de materiais. Esse alinhamento com estudos prévios reforça a validade das soluções implementadas.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo a modernização de um chute de transferência em uma mineradora de bauxita, utilizando a simulação DEM (*Discrete Element Method*) como ferramenta principal para a análise e otimização do sistema. Através de uma abordagem estruturada, foram identificados os principais problemas no chute existente, como desalinhamento do fluxo de material, impacto elevado e desgaste prematuro dos componentes do transportador de correia.

Inicialmente, foram realizados ensaios experimentais, incluindo granulometria, ângulo de repouso e atrito material-parede, os quais forneceram parâmetros fundamentais para a calibração do modelo numérico. A precisão dos valores experimentais garantiu a representatividade das simulações DEM, permitindo uma análise detalhada do comportamento do fluxo de material no sistema.

As simulações do projeto atual evidenciaram os problemas críticos, como a queda desalinhada do material e os esforços concentrados na correia transportadora. Para solucionar essas questões, foram propostas modificações geométricas no chute, incluindo:

- Extensão da rampa de queda para reduzir o impacto do material;
- Instalação de uma defletora no módulo inferior para alinhar o fluxo.

Os resultados obtidos após as modificações demonstraram melhorias expressivas, destacando:

- Redução de 6,1% nos esforços normais máximos aplicados à correia;
- Redução de 23,3% nos esforços cisalhantes, o que prolonga a vida útil da correia;
- Alteração do desalinhamento de 15,9% para 1,1%.

As melhorias implementadas confirmaram a eficácia da simulação DEM como uma ferramenta robusta e eficiente para o dimensionamento e otimização de componentes de sistemas de transporte em mineração. O projeto do chute modernizado não apenas solucionou os problemas identificados, mas também trouxe ganhos significativos para a mineradora, como:

- Redução dos custos operacionais devido à menor frequência de manutenções e substituição de componentes;
- Maior confiabilidade operacional, reduzindo paradas não planejadas;
- Aumento da vida útil da correia transportadora e dos cavaletes de impacto.

Por fim, este estudo reforça a relevância do uso de ferramentas computacionais, como o DEM, na solução de problemas complexos em sistemas industriais. A metodologia aplicada pode ser replicada em outras minerações ou setores industriais que utilizam transportadores de

correia, contribuindo para a modernização e a eficiência operacional de sistemas de manuseio de materiais. Estudos futuros podem incorporar análises dinâmicas e de vibração, bem como uma avaliação econômica detalhada das melhorias propostas, consolidando ainda mais os benefícios apresentados.

5.1 Limitações e Sugestões para Estudos Futuros

Apesar das melhorias, este estudo apresenta limitações relacionadas à análise apenas dos aspectos mecânicos do sistema. Estudos futuros poderiam incluir:

- **Análise de Vibração:** Avaliar o impacto das modificações na vibração da correia e no comportamento dinâmico do sistema.
- **Simular novamente as condições mostradas nesse estudo.** Uma com a condição mínima de umidade e outra com a condição máxima de umidade encontrada na planta
- **Modelagem Financeira:** Estimar os custos e benefícios ao longo da vida útil do sistema para quantificar o retorno do investimento das modificações.

REFERÊNCIAS

- ALSPAUGH, M. **Bulk Material Handling by Conveyor Belt 7**. Littleton: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration (SME), 2008. 440 p.
- ASTM. ASTM D 6128-00 – **Standard Test Method for Shear Testing of Bulk Solids Using the Jenike Shear Cell**. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2000.
- BLAZEJ, Ryszard; JURDZIAK, Leszek; KIRJANÓW, Agata; KOZŁOWSKI, Tomasz. **A device for measuring conveyor belt thickness and evaluating the changes in belt transverse and longitudinal profile**. Diagnostyka, Wrocław University of Science and Technology, 2017.
- CEMA (Conveyor Equipment Manufacturers Association). **Transportadores de correia para materiais a granel**. 7. ed. Naples: CEMA, 2014.
- DONOGHUE, A. Michael; FRISCH, Neale; OLNEY, David. **Bauxite Mining and Alumina Refining Process Description and Occupational Health Risks**. Journal of Occupational Health, 2024.
- DOROSZUK, Błażej; KRÓL, Robert; WAJS, Jarosław. **Simple design solution for harsh operating conditions: redesign of conveyor transfer station with reverse engineering and DEM simulations**. Energies, v. 14, n. 4008, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en14134008>. Acesso em: 13 out. 2024.
- DYNAMOX S.A. **Monitoramento de vibração em chute de transportadora de correia**. 2023. Disponível em: <https://dynamox.net>. Acesso em: 13 out. 2024.
- FEDORKO, G.; MOLNÁR, V.; ŽIVČÁK, J.; DOVICA, M.; HUSÁKOVÁ, N. **Failure analysis of textile rubber conveyor belt damaged by dynamic wear**. Engineering Failure Analysis, v. 28, p. 103-114, 2013. Disponível em: <http://www.elsevier.com/locate/engfailanal>. Acesso em: 12 out. 2024.
- FIGUEIREDO, B. R. **Minérios e ambiente**. Campinas: Unicamp, 2000.
- GAVI, J. P. **Manual de inspeção e manutenção de correias transportadoras**. 4. ed. Vitória, 2012.
- HADZIHAFIZOVIC, Dzevad. **Conveyor belt technique design and calculation**. Sarajevo: University of Sarajevo, 2023.
- HASTIE, David Bryan. **Belt conveyor transfers: quantifying and modeling mechanisms of particle flow**. 2010. Thesis (PhD in Mechanical Engineering) – University of Wollongong, Faculty of Engineering, School of Mechanical, Materials and Mechatronic Engineering, 2010.
- ILIC, Dusan; HICKS, Thomas J. **Towards the development of design criteria for reduced wear in iron ore transfers**. In: SEMINÁRIO DE REDUÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO E MATÉRIAS-PRIMAS, 46.; SIMPÓSIO BRASILEIRO DE MINÉRIO DE FERRO, 17.; SIMPÓSIO BRASILEIRO DE AGLOMERAÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO, 4., 2016, Rio de Janeiro. *Anais* [...]. Rio de Janeiro: ABM Week, 2016. p. 16-26.

LIMA, Ronária Silva. **Parâmetros cinéticos e termodinâmicos da adsorção do alaranjado de metila por hidróxidos triplos lamelares obtidos a partir do rejeito de bauxita**. 2024. Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2024. Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2024.6333>. Acesso em: 12 out. 2024.

MERCÚRIO, Correias Mercúrio S/A Indústria e Comércio. **Manual Técnico de Correias Transportadoras** 3. ed. São Paulo: Editora Schoba, 2019.

METSO. **Descrição do sistema de carregamento do transportador**. Disponível em: <https://www.metso.com>. Acesso em: 12 out. 2024.

PAIVA, Monica Katyusca Nunes de; DELBONI JUNIOR, Homero; JATOBÁ, Thiago. **Performance analysis of the beneficiation process of bauxite from the Juruti Mine**. REM - International Engineering Journal, Ouro Preto, v. 75, n. 2, p. 147-155, abril. / junho. 2022. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/0370-44672020750136>. Acesso em: 12 out. 2024.

ROCHA, D.M.; MACIAS, P.H.S. **Projeto de transportadores de correia e chutes de transferência através de pacotes computacionais**. 2012. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Belém, 2012.

SWINDERMAN, R.; MARTI, A.; GOLDBECK, L.; MARSHALL, D. **Foundations™: Guia Prático para um Controle mais Limpo, Seguro e Produtivo de Pó e Material a Granel**. 4. ed. Neponset, Illinois: Martin Engineering, 2012.

TODKAR, Sayali; RAMGIR, Milind. Design of belt conveyor system. **International Journal of Science, Engineering and Technology Research (IJSETR)**, v. 7, n. 7, p. 458-462, Jul. 2018.

VELMURUGAN, G.; PALANISWAMY, E.; SAMBATHKUMAR, M.; VIJAYAKUMAR, R.; SAKTHIMURUGA, T. M. **Conveyor belt troubles (bulk material handling)**. International Journal of Emerging Engineering Research and Technology, v. 2, n. 3, p. 21-30, Jun. 2014.

XIE, Liyu; ZHONG, Wenqi; ZHANG, Hao; YU, Aibing; QIAN, Yujun; SITU, Yougong. **Wear process during granular flow transportation in conveyor transfer**—school of Energy and Environment, Southeast University, 2016.