



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

GEOVANE SANTIAGO MADALENO

**DIAGNÓSTICO E SOLUÇÃO PARA O DESALINHAMENTO DE UMA CORREIA
TRANSPORTADORA EM UMA MINERADORA DE FERRO**

TUCURUÍ
2025

GEOVANE SANTIAGO MADALENO

**DIAGNÓSTICO E SOLUÇÃO PARA O DESALINHAMENTO DE UMA CORREIA
TRANSPORTADORA EM UMA MINERADORA DE FERRO**

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. Fernando Nunes da Silva

TUCURUÍ
2025

**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)**

GEOVANE SANTIAGO MADALENO

DIAGNÓSTICO E SOLUÇÃO PARA O DESALINHAMENTO DE UM CORREIA TRANSPORTADORA EM UMA MINERADORA

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: 20 / 06 / 2025

Conceito: **BOM**

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Fernando Nunes da Silva
FEM/CAMTUC/UFPA

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

Prof. Me. Maycon Magalhães Castro
FEM/CAMTUC/UFPA

Dedico este trabalho a minha mãe Regina, meu falecido pai José Ribamar, meus irmãos, meus sobrinhos, meus professores e principalmente a Deus, que toda honra e glória seja dado a ele. Este trabalho é mais fruto da árvore que vocês me ajudaram a plantar.

AGRADECIMENTOS

Costumo dizer que ninguém conquista algo sozinho. Mesmo quando se acredita ter caminhado só, sempre houve alguém que, de alguma forma, contribuiu para a realização do objetivo. Dito isso, é com gratidão que utilizo este espaço para agradecer aos que foram fundamentais na minha caminhada até aqui.

Em primeiro lugar, agradeço e exalto o nome de Deus, que desde antes do meu nascimento já havia traçado com perfeição cada passo da minha trajetória. A Ele, toda honra e glória. “Obrigado, meu Deus.”

Agradeço com todo meu amor à minha mãe, Regina Santiago Gonçalves, por tudo que fez por mim. Abrir mão dos próprios sonhos para viver os sonhos de um filho é a forma mais pura e sincera de amor.

À minha irmã Adriana Santiago, por todo apoio durante a minha jornada universitária, e aos meus demais irmãos, Waldenice, Waldeires, Ronismar, Romário, Aline, Ronan e Lucas Santiago, minha gratidão por todo suporte e incentivo ao longo desses anos.

Aos meus sobrinhos, que foram fonte constante de motivação: Ingrid Gabrielly, Hyago Ruan, Maria Vitória, Rebeca, Ana Ester, Ana Lins e Mateus Henrique.

Ao meu tio Luiz Santiago e a todos os familiares que me apoiaram, meus sinceros agradecimentos.

A minha namorada, amiga e parceira de faculdade, Adrienny Ferreira Santana, meu carinho e gratidão. Sua presença foi essencial nos momentos difíceis e ainda mais marcante nos dias felizes. Obrigado por caminhar comigo.

Aos amigos de infância Hayllon, Hallyton e Wanderson, por acreditarem em mim e nos meus sonhos, meu muito obrigado por todo apoio.

Agradeço imensamente ao meu orientador, Fernando Nunes da Silva, e ao meu coorientador, Arthur dos Reis Lemos Fontana, pelas valiosas contribuições neste trabalho e durante toda minha trajetória acadêmica. São verdadeiros mestres e inspirações.

Ao meu amigo/irmão Nataziel do Carmo Silva, que dividiu comigo o peso da faculdade e esteve presente em todos os momentos, bons e difíceis — obrigado por tudo. Também agradeço aos colegas Luan Xavier, Geovane Nascimento e, em especial, Ryã Hálef, por toda a parceria e superação compartilhada ao longo da graduação. Obrigado, meus “irmãos da UFPA”.

À minha amiga/irmã Ana Luiza, por estar comigo em momentos especiais e pelo apoio durante meu período em Tucuruí, minha gratidão eterna.

Agradeço ao amigo que fiz durante o estágio, José Armando, pela amizade e parceria

em meio a essa experiência longe de casa, além da sua importante contribuição para este trabalho. Registro também minha sincera gratidão ao Angelim Júnior, que contribuiu de forma direta para o desenvolvimento deste trabalho.

Minha gratidão se estende à minha orientadora de estágio, Sarah Saldanha, à engenheira Aliny Jardim e a todos que estiveram comigo durante as etapas vividas na Alcoa e na Vale, pelas trocas, aprendizados e apoio ao longo dessa jornada.

À todos professores, em especial Walter Santos, Maciel Costa e Jarmeson Bandeira, e a todos os docentes e servidores públicos da UFPA – Campus Tucuruí, que fizeram parte da minha formação, meu muito obrigado.

Por fim, sou imensamente grato a todos que, de forma direta ou indireta, contribuíram para minha trajetória acadêmica. Cada gesto, palavra ou presença foi essencial para minha conquista. Muito obrigado!

*"Tudo posso naquele que me fortalece."
(Paulo)*

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo sobre as causas do desalinhamento de uma correia transportadora de seção transversal do tipo “U”, instalada em uma mineradora localizada em Canaã dos Carajás – PA. O objetivo principal foi identificar os fatores que contribuem para o desalinhamento e propor soluções eficazes. A metodologia adotada envolveu análises de campo e simulações numéricas por meio do Método dos Elementos Discretos (DEM). Os resultados indicaram que a alimentação assimétrica do minério no chute de transferência era a principal causa do desalinhamento. Como solução, foi proposta a instalação de uma caixa de pedra (stone box) no chute, visando uniformizar a distribuição do material sobre a correia. As simulações demonstraram uma redução na assimetria do carregamento de 40,9% para 6,2%, representando uma melhoria de aproximadamente 85%. A implementação dessa solução contribui para o aumento da confiabilidade operacional e a redução de paradas corretivas. O estudo reforça a relevância do uso de simulações computacionais como apoio à tomada de decisões em ambientes industriais complexos.

Palavras-chave: mineração; DEM; simulação; confiabilidade; manutenção.

ABSTRACT

This study presents an analysis of the causes of misalignment in a U-shaped cross-section conveyor belt installed at a mining site located in Canaã dos Carajás, Pará, Brazil. The main objective was to identify the contributing factors to the misalignment and propose effective corrective measures. The methodology included field inspections and numerical simulations using the Discrete Element Method (DEM). The results showed that the primary cause of the misalignment was the asymmetric material feeding at the transfer chute. As a solution, a stone box was installed inside the chute to improve the distribution of the ore flow over the belt. The simulations revealed a significant reduction in the loading asymmetry, from 40.9% to 6.2%, representing an improvement of approximately 85%. The implementation of this solution contributes to greater system reliability and reduces corrective maintenance interruptions. This study highlights the importance of technical analysis supported by computational simulation as a decision-making tool in complex industrial environments.

Keywords: *mining; DEM; simulation; reliability; maintenance.*

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Mina de minério de ferro a céu aberto	17
Figura 2 – Imagem área mina de ferro do Projeto S11D.....	18
Figura 3 – Layout S11D Serra Sul Simplificado	18
Figura 4 – Transportador de correia	19
Figura 5 – Componentes de um transportador de correia.....	20
Figura 6 – Estrutura da correia de transporte	20
Figura 7 – Tipos de tambores	21
Figura 8 – Tipos de roletes	22
Figura 9 – Localização dos roletes no transportador	23
Figura 10 – Tensionadores de correia.....	23
Figura 11 – Raspador de correia.....	24
Figura 12 – Chute de transferência.....	24
Figura 13 – Guias laterais.....	25
Figura 14 – Transportador de saída da usina C	26
Figura 15 – NICs ao longo ano de 2024.....	27
Figura 16 – Impacto por modo de falha em 2024.....	27
Figura 17 – Desalinhamento da correia	28
Figura 18 – Geometria dos equipamentos	30
Figura 19 – Definições das geometrias.....	31
Figura 20 – Sentido do fluxo do material	32
Figura 21 – Parâmetros de simulação	32
Figura 22 – Resultado da simulação na condição atual.....	33
Figura 23 – Resultado da simulação na condição atual – vista superior	34
Figura 24 – Portais esquerdo e direito	34
Figura 25 – Desalinhamento na condição atual.....	35
Figura 26 – Stone box.....	36
Figura 27 – Simulação com stone box (lateral).....	36
Figura 28 – Resultado da simulação com stone box – vista superior.....	37
Figura 29 – Desalinhamento com stone box	37
Figura 30 – Comparação dos resultados.....	38
Figura 31 – Instalação do stone box	38

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
BFA	Bulk Flow Analyst
CEMA	Conveyor Equipment Manufacturers Association
DEM	Discrete Element Method (Método dos Elementos Discretos)
DF	Disponibilidade Física
DI	Disponibilidade Intrínseca
HMC	Horas de Manutenção Corretiva
MTBF	Mean Time Between Failures (Tempo Médio Entre Falhas)
MTTR	Mean Time to Repair (Tempo Médio para Reparo)
NIC	Número de Intervenções Corretivas
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
NBR NM	Norma Brasileira Norma Mercosul
TR	Transportador
TC	Transportador de Correia
T	Tonelada
UFPA	Universidade Federal do Pará
EP	Ester Polyamide

LISTA DE SÍMBOLOS

%	Por cento
s	Segundos
t	tonelada
Q	Taxa de fluxo de massa
ρ	Densidade
g	Aceleração da gravidade
d	Diâmetro da partícula
ρ_b	Densidade aparente do material granular

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 Objetivo	16
1.1.1 Objetivos específicos	17
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1 Minério de ferro	17
2.2 Projeto S11D	17
2.3 Transportadores de correia	19
2.3.1 Componentes	19
2.3.2 Correia transportadora	20
2.3.3 Tambores	21
2.3.4 Roletes	22
2.3.5 Esticadores	23
2.3.6 Raspadores	23
2.3.7 Chutes de transferência	24
2.3.8 Guias laterais	25
2.4 TRANSPORTADOR ESTUDADO	25
2.5 Problema e causa	26
2.6 Desalinhamento de correia.	27
3 MATERIAIS E MÉTODOS	29
3.1 Caracterização do material	29
3.2 Método dos elementos discretos - DEM	29
3.2.1 Simulação no Bulk Flow Analyst	30
3.2.1.1 Simulação	30
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	33
4.1 Simulação na condição atual	33
4.2 Solução proposta	35
4.2.1 Simulação com stone box	36
4.3 Ganhos	37
5 CONCLUSÃO.....	40

6 REFERÊNCIAS41

1 INTRODUÇÃO

Transportadores de correias é um equipamento largamente utilizado em processos que necessitam de fluxo contínuo de materiais, isso se dá devido sua versatilidade, altas taxa de transporte de materiais e a confiabilidade que traz a processo que é aplicado. Além disso tem um impacto ambiental inferior a demais meios de transportes utilizados atualmente (Vicente, 2013).

Na mineração os transportadores são bastante utilizados devidos benefícios que esse equipamento traz nas operações de extração e beneficiamento do minério. Um desses benefícios é alta capacidade transportar levadas quantidade de materiais por hora. Segundo CEMA (2014), outra vantagem dos transportadores de correia em relação a outros meios de transporte é sua conformidade com os requisitos ambientais. Esse fator incentiva as indústrias a adotarem esse tipo de transporte, uma vez que o cumprimento das leis e normas ambientais é uma obrigação das empresas.

Com tudo, os transportadores de correias apresentam falhas de funcionamento que prejudica o escoamento do material na mineração gerando grandes e numerosas intervenções corretivas. Uma dessas falhas é o desalinhamento da sua correia, segundo JW Engenharia (2020), esse fenômeno ocorre quando a correia se desloca lateralmente, saindo de sua trajetória ideal sobre roletes e tambores. As causas podem ser diversas, incluindo alimentação irregular, falhas em componentes como roletes travados, desgaste em tambores ou até problemas estruturais no alinhamento do transportador.

Localizado na cidade de Canaã dos Carajás, no estado do Pará, o projeto S11D é considerado um dos maiores empreendimentos de mineração de ferro. Com um investimento bilionário, o projeto tem como objetivo a extração e beneficiamento de minério de ferro com menor impacto ambiental, utilizando um sistema inovador de mineração o S11D implementou um sistema de mineração "*truckless*", substituindo caminhões por correias transportadoras, o que reduz significativamente as emissões de CO₂ e os custos operacionais (Vale, 2016).

1.1 Objetivo

Analisar e estudar as causas do desalinhamento da correia transportadora de secção transversal com a forma de U, que pertencente ao projeto S11D, localizada em Canaã dos Carajás – PA. Além disso, será proposto uma solução e melhoria para o problema identificado. Ao longo do estudo, será destacada a importância operacional dessa correia e os impactos produtivos causados pelo seu desalinhamento.

1.1.1 Objetivos específicos

- Analisar dados de parada por desalinhamento;
- Identificar as causas do desalinhamento;
- Propor soluções e melhoria;
- Garantir a confiabilidade do equipamento.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Minério de ferro

Um dos principais recursos minerais explorados no Brasil, o minério de ferro é fundamental para a indústria siderúrgica global. Sua extração ocorre principalmente em grandes depósitos ferríferos, como os encontrados no Quadrilátero Ferrífero e na Província Mineral de Carajás. A formação dessas jazidas está associada a processos geológicos que enriquecem os minérios em ferro, tornando sua exploração economicamente viável. No Brasil, a extração do minério envolve diferentes métodos, incluindo lavra a céu aberto (Figura 1) e beneficiamento para elevar o teor do ferro antes de sua comercialização. (Carvalho et al., 2013).

Figura 1 – Mina de minério de ferro a céu aberto



Fonte: Tubos ABC.

2.2 Projeto S11D

A extração e o beneficiamento do minério de ferro no S11D seguem um modelo inovador que prioriza a eficiência e a sustentabilidade. A lavra ocorre a céu aberto (Figura 2), utilizando um sistema de mineração "*truckless*", que substitui os tradicionais caminhões fora de estrada por correias transportadoras interligadas a escavadeiras e britadores móveis. O minério extraído é transportado por um Transportador de Correia de Longa Distância (TCLD)

até a usina de processamento, onde passa por um beneficiamento a seco, eliminando o uso de água no processo e reduzindo a necessidade de barragens de rejeitos. Essas inovações fazem do S11D um modelo de mineração com menor impacto ambiental e maior eficiência operacional (Vale, 2016).

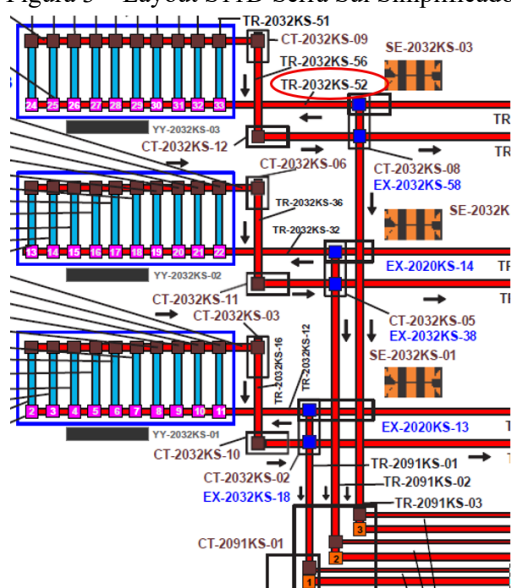
Figura 2 – Imagem área mina de ferro do Projeto S11D.



Fonte: Revista Vale (2016).

No layout simplificado do Projeto S11D, apresentado na Figura 3, é possível observar diversos transportadores de correia do tipo “U”. Dentre eles, destaca-se o transportador circulado em vermelho, que será o foco deste estudo. Esse equipamento é responsável por transferir o minério de ferro já beneficiado até o pátio de produtos ou diretamente para a expedição, o que justifica sua elevada importância dentro do processo produtivo.

Figura 3 – Layout S11D Serra Sul Simplificado



Fonte: Adaptado de Vale (2025).

2.3 Transportadores de correia

O transportador de correia é um equipamento essencial para a movimentação contínua de materiais em diversos setores industriais. Ele é composto por uma estrutura que sustenta uma correia sem fim, movida por tambores e roletes, permitindo o transporte eficiente de materiais a granel ou cargas unitárias, como é demonstrado na Figura 4. Além de garantir segurança e economia na operação, os transportadores de correia oferecem alta confiabilidade e versatilidade, podendo ser adaptados para diferentes tipos de materiais e condições de operação (Eletrobrás et al., 2009)

De acordo com Swinderman (2009), os transportadores de correia são amplamente utilizados no manuseio de materiais devido ao seu baixo custo operacional. Entre as diversas opções disponíveis, esse sistema destaca-se por oferecer o menor custo de transporte, manutenção, energia e mão de obra por tonelada transportada. No entanto, essas vantagens podem ser comprometidas caso não haja uma análise criteriosa do tipo de material a ser manuseado e do processo como um todo no momento da especificação do sistema. Dessa forma, uma abordagem técnica detalhada é essencial para garantir eficiência e reduzir custos operacionais a longo prazo.

Figura 4 – Transportador de correia



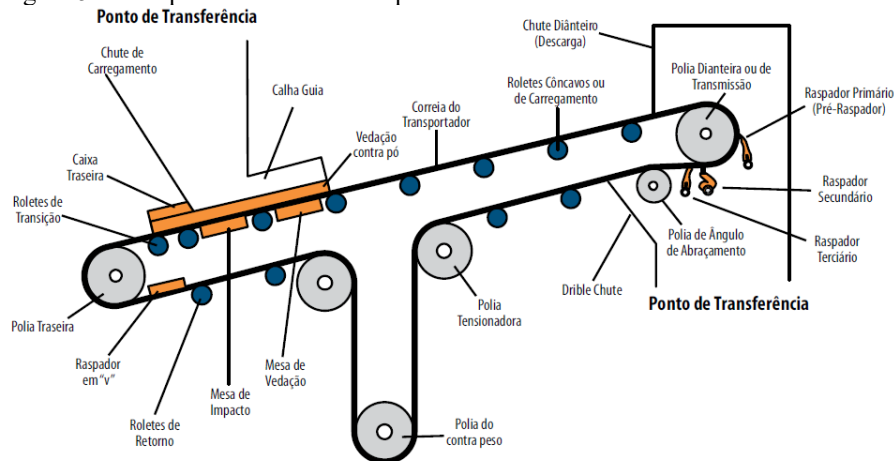
Fonte: Eletrobrás (2009).

2.3.1 Componentes

Como todo equipamento, os transportadores de correia são formados por diversos componentes que garante o funcionamento adequado do mesmo. De acordo com Swinderman et al. (2009), os transportadores de correia são compostos por diversos componentes essenciais que garantem seu funcionamento eficiente e seguro, como é mostrado na Figura 5. Entre os

principais elementos, destacam-se a correia transportadora, responsável pelo deslocamento do material; os tambores e roletes, que oferecem suporte e direcionamento à correia; e o sistema de acionamento, que fornece a energia necessária para o movimento. Além disso, estruturas de sustentação, dispositivos de limpeza e mecanismos de segurança são fundamentais para otimizar o desempenho e prolongar a vida útil do equipamento.

Figura 5 – Componentes de um transportador de correia



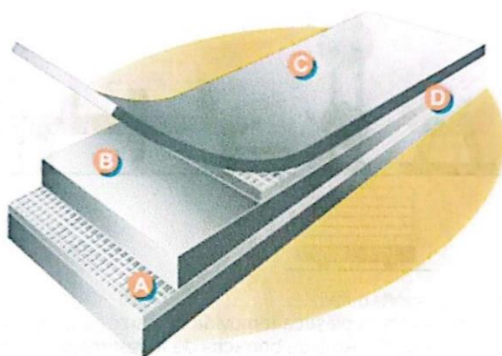
Fonte: Swinderman et al. (2009).

2.3.2 Correia transportadora

Considerada a parte principal do transportador, pois é o componente responsável por realizar o transporte do material a ser transportado, e corresponde a um valor de 30 a 40 % do transportador por completo (Vicente, 2013).

Segundo o mesmo autor “uma correia transportadora é constituída basicamente de dois elementos: carcaça e coberturas, sendo que cada parte é especificada para o tipo de transporte solicitado” (Vicente, 2013, p. 8). Na Figura 6 é ilustrado uma correia de EP (E, de "*ester*") e nylon (P, de "*polyamide*").

Figura 6 – Estrutura da correia de transporte



Fonte: Vicente (2013).

- A. Construção da carcaça;
- B. Borracha de ligação;
- C. Borracha de cobertura;
- D. Construção da correia com borda integral.

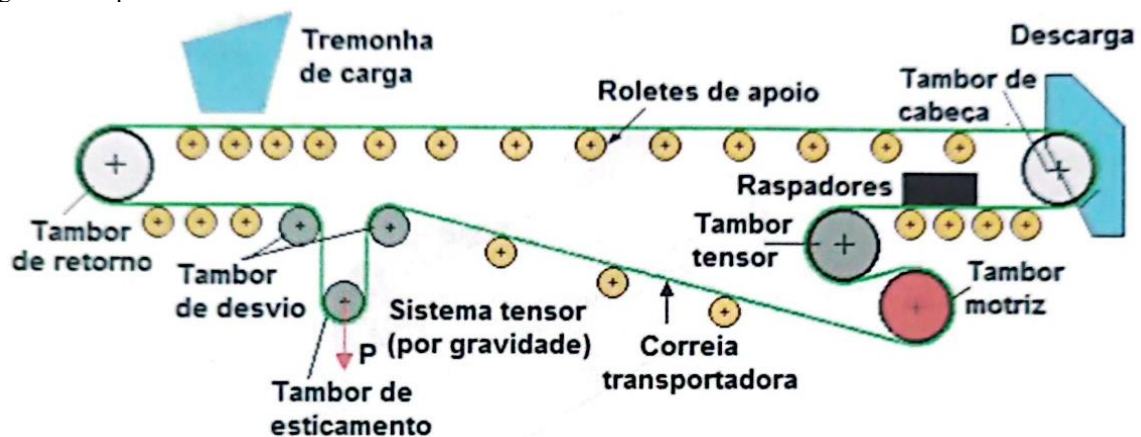
2.3.3 Tambores

Normalmente os tambores são feitos de aço e tem como função principal tracionar a correia para iniciar o transporte do material, denominado tambor motriz. Além disso, os tambores possuem outras funcionalidades no transportador, como a de efetuar desvios e dobras nas correias, veja na Figura 7 que mostra os diferentes tipos de tambores e suas funcionalidades.

Classificação dos tambores:

- **Tambor motriz:** Responsável na transmissão de torque;
- **Tambor de retorno:** Efetua o retorno da correia a sua posição inicial e em alguns transportadores são responsáveis pelo tensionamento da correia;
- **Tambor de esticamento:** Utilizado para manter a tensão ideal de funcionamento;
- **Tambor de desvio:** Utilizado para desviar o curso da correia

Figura 7 – Tipos de tambores



Fonte: Vicente (2013).

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 motriz, tambor de retorno, tambor de desvio, tambor de tensionamento, tambor de encosto entre outros.

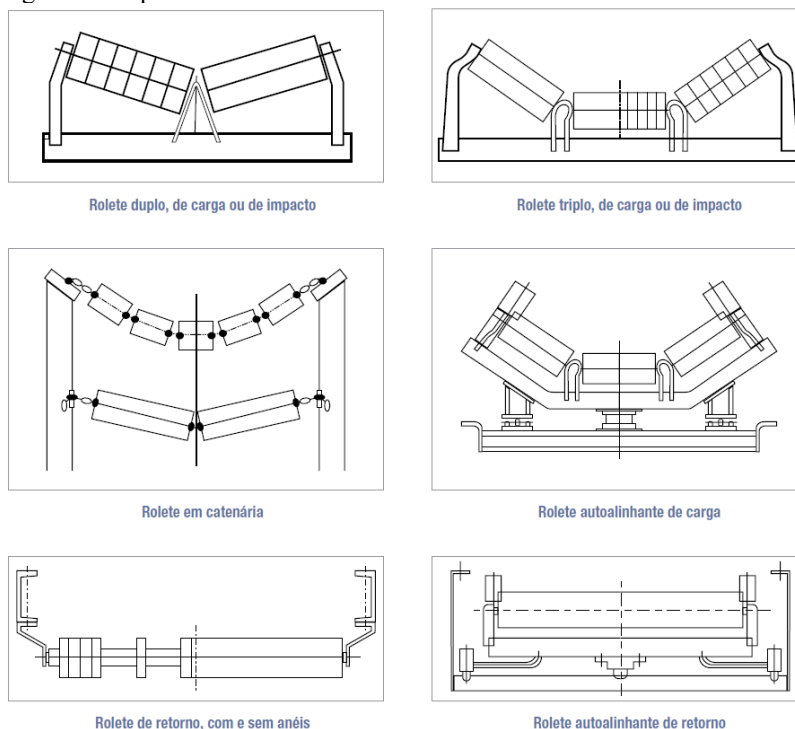
2.3.4 Roletes

Os roletes desempenham um papel essencial nos transportadores de correia, sendo responsáveis por suportar e guiar a correia ao longo de sua trajetória. Eles são compostos por um conjunto de rolos cilíndricos, eixos, rolamentos, vedação e suportes de sustentação. Esses componentes garantem a estabilidade do sistema e influenciam diretamente na eficiência operacional, reduzindo custos de manutenção e energia. A correta especificação dos roletes, considerando o tipo de material transportado e o arranjo da correia, é fundamental para a durabilidade do sistema (GAVI, 2011).

De acordo com a CEMA (2014), os roletes dos transportadores de correia são classificados em dois tipos básicos: roletes de carga e roletes de retorno. Os roletes de carga têm a função de suportar o peso do material transportado ao longo do percurso, garantindo estabilidade no transporte. Já os roletes de retorno são responsáveis por sustentar a correia vazia em seu trajeto de volta, preparando-a para um novo ciclo.

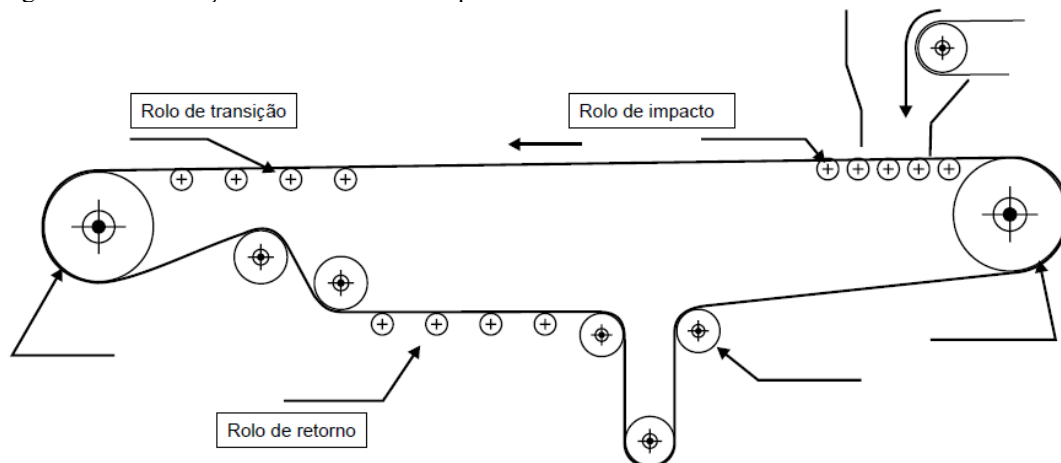
Esses são os tipos básicos de roletes, mas há vários modelos de roletes como podemos ver na Figura 8 e 9 abaixo. Destaca-se os roletes autoalinhantes que segundo o GAVI (2011, p. 178), é “Conjunto de rolos cujo suporte é dotado de mecanismo giratório, com a finalidade de controlar o deslocamento lateral da correia através do contato da mesma com rolos laterais, convenientemente dispostos. Usualmente, são colocados no lado carregamento e no retorno.”

Figura 8 – Tipos de roletes



Fonte: GAVI (2011).

Figura 9 – Localização dos roletes no transportador

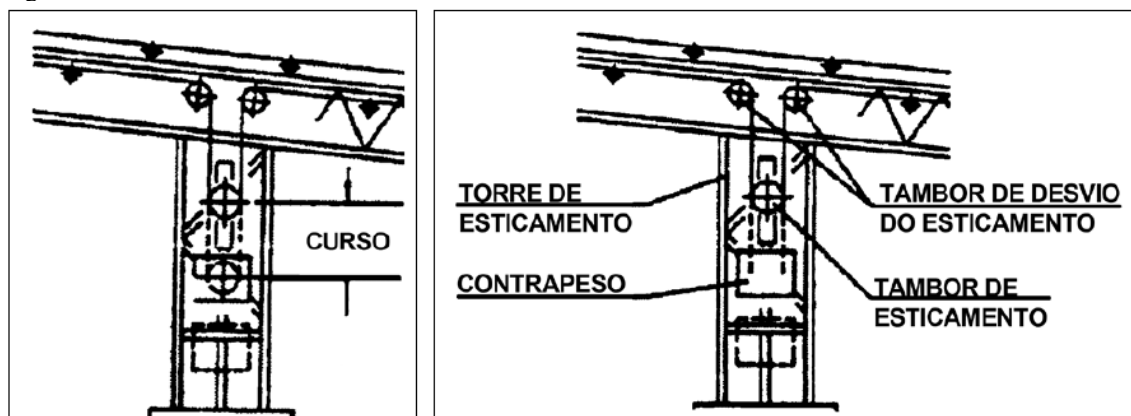


Fonte: GAVI (2011).

2.3.5 Esticadores

De acordo com Swinderman et al. (2009), os esticadores e contrapesos são fundamentais para garantir a operação eficiente dos transportadores de correia. O sistema de esticamento tem a função de assegurar a tensão adequada na correia, evitando deslizamentos e garantindo um funcionamento contínuo e seguro. Existem diferentes tipos de esticamento, como o manual por parafuso, indicado para pequenos transportadores, e o automático, que pode ser por gravidade (Figura 10), molas ou sistemas especiais.

Figura 10 – Tensionadores de correia



Fonte: GAVI (2011).

2.3.6 Raspadores

Os raspadores são utilizados para realizar a limpeza da correia, pois, em casos onde o material a ser transportado é abrasivo e pegajoso, o material pode ficar grudado em algumas partes do transportador, causando o desalinhamento da correia.

Os raspadores de lâminas são normalmente o equipamento mais utilizado para fazer essa

limpeza (Figura 11). Ele deve exercer uma pressão suficiente na correia, para remoção dos resíduos (Eletrobrás et al., 2009).

Figura 11 – Raspador de correia



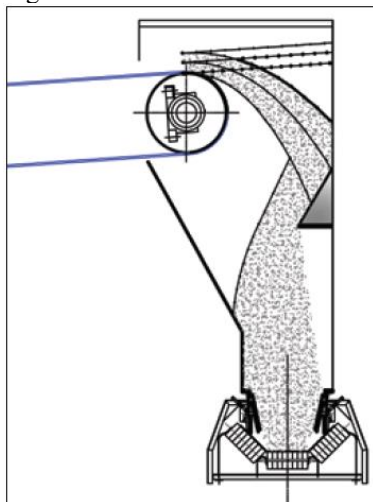
Fonte: Eletrobrás (2009).

2.3.7 Chutes de transferência

Os chutes de transferência desempenham um papel fundamental nos transportadores de correia, pois são responsáveis por guiar e controlar o fluxo de material entre diferentes seções do sistema. Um projeto adequado desses componentes minimiza a degradação do material, reduz o acúmulo de resíduos e previne problemas como entupimentos e desgaste prematuro da correia. Além disso, a correta disposição dos chutes e a escolha dos materiais de revestimento influenciam diretamente na eficiência operacional e na vida útil do transportador (GAVI, 2011).

Na Figura 12 é ilustrado um chute, que tem a função de reduzir o impacto do material transportado sobre a correia, protegendo sua estrutura e prolongando sua vida útil.

Figura 12 – Chute de transferência.

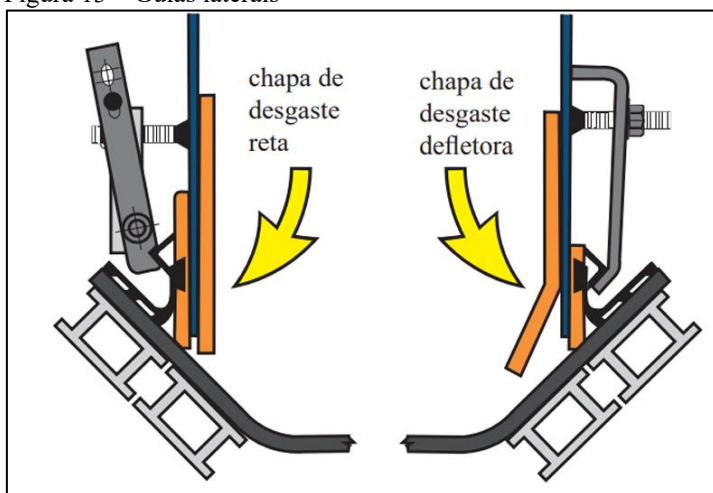


Fonte: GAVI (2011)

2.3.8 Guias laterais

As guias laterais desempenham um papel fundamental nos transportadores de correia, pois são responsáveis por reter o material na correia após a saída do chute de carregamento, garantindo que ele alcance a velocidade da correia receptora de maneira controlada. Elas funcionam como uma extensão do chute de carregamento e devem ser projetadas para minimizar perdas de material e evitar o desgaste prematuro da correia. Normalmente construídas em chapas de aço, as guias laterais possuem uma folga padronizada acima da correia, vedada por chapas de revestimento e tiras de borracha ajustáveis, permitindo a substituição sempre que necessário (Figura 13). 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.

Figura 13 – Guias laterais

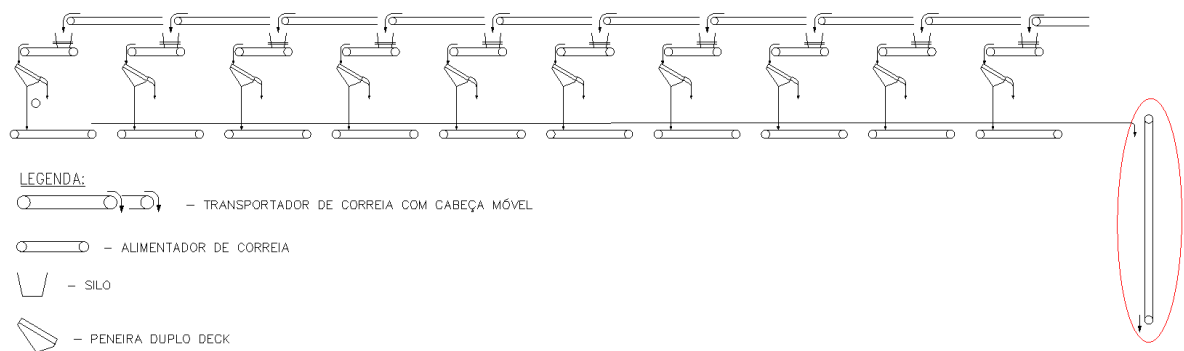


Fonte: Swinderman et al. (2009).

2.4 TRANSPORTADOR ESTUDADO

A Transportador de Correia (TC) analisada neste estudo corresponde à TC de saída de uma usina de peneiramento, responsáveis pelo transporte do minério de ferro já beneficiado até o pátio de produtos. Essa transportador (TR) desempenham um papel essencial na logística da mineração, garantindo a movimentação eficiente do material após o processo de beneficiamento. Conforme ilustrado na Figura 14, é possível visualizar o fluxograma do transportador de correia da usina C, objeto deste estudo. Observa-se que esse transportador recebe alimentação de minério de ferro proveniente de 10 peneiras, evidenciando sua relevância no escoamento do material beneficiado.

Figura 14 – Transportador de saída da usina C



Fonte: Autoria própria (2025).

No projeto, existem outros dois transportadores de correia semelhantes a este, TR2032KS12 e TR2032KS32 localizados nas usinas A e B respectivamente. Dessa forma, a solução desenvolvida para o TR2032KS52 será replicada nos demais equipamentos, visando padronizar as melhorias e evitar falhas semelhantes.

2.5 Problema e causa

Em 2024, os transportadores de Tag TR2032KS12/32/52 (transportador estudado e similares a eles) enfrentaram múltiplas paradas (NIC – Números de Intervenções Corretiva) categorizadas como HMC (Horas de Manutenção Corretiva), impactando significativamente a produção de minério de ferro. É importante ressaltar que esses transportadores tem um impacto substancial devido ao seu papel crucial no sistema, conhecido como singelo, onde suas paradas afetam todos os equipamentos precedentes. Como resultado, os seguintes indicadores foram prejudicados:

- DF (Disponibilidade Física)
- DI (Disponibilidade Intrínseca)
- MTBF (Mean Time Between Failures – Tempo Médio entre Falhas)
- MTTR (Mean Time to Repair – Tempo Médio para Reparo)

Uma das principais causas dessas falhas foi o desalinhamento da correia dos transportadores, conforme ilustrado nos gráficos de perfil de perda desses ativos, veja as Figuras 15 e 16. Em um estudo de causa raiz realizado por equipes multidisciplinares, concluiu-se que um dos fatores que contribuem para o desalinhamento é a queda do material na correia de forma não uniforme, o que provoca ou intensifica o problema.

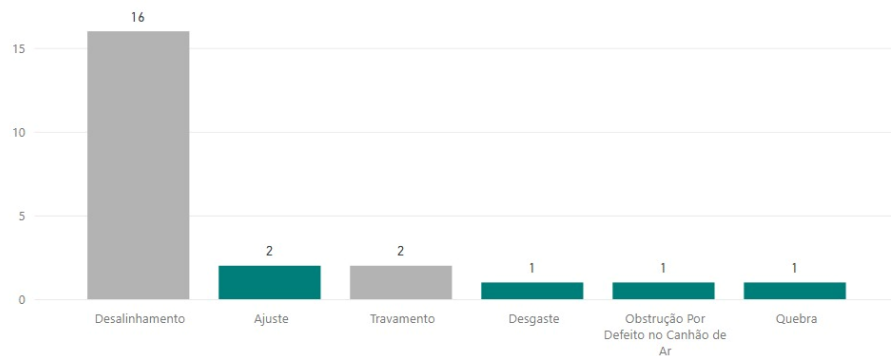
Figura 15 – NICs ao longo ano de 2024



Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 16 – Impacto por modo de falha em 2024

Impacto por Modo de Falha (NIC)- Mês



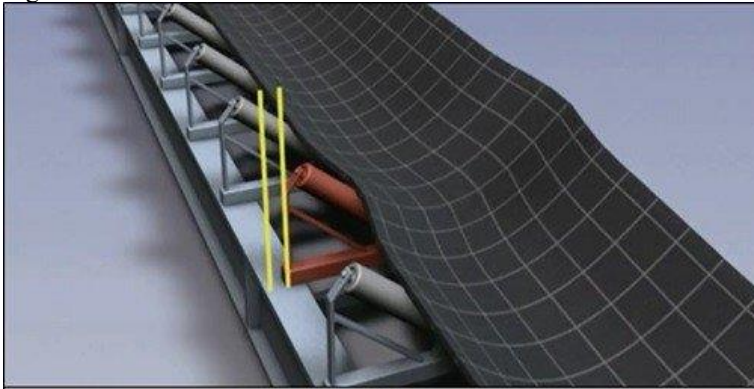
Fonte: Autoria própria (2025).

Nas imagens acima, é possível observar que o desalinhamento foi o principal ofensor entre os modos de falha dos ativos. Também se verifica que essas falhas ocorreram ao longo de todo o ano de 2024, com maior intensidade no último trimestre. Vale ressaltar que, em algumas ocasiões, as chaves de desalinhamento foram desativadas, o que indica que o impacto real pode ser ainda maior do que o demonstrado nas Figuras 15 e 16.

2.6 Desalinhamento de correia.

O desalinhamento de correias transportadoras é um problema recorrente em sistemas de transporte de materiais a granel, especialmente nas indústrias de mineração. Esse evento ocorre quando a correia se desloca lateralmente (Figura 17) em relação ao centro dos tambores e roletes, comprometendo a estabilidade e eficiência do sistema.

Figura 17 – Desalinhamento da correia



Fonte: JW Engenharia (2020).

De acordo com a Correias Mercúrio (2023), os principais fatores que contribuem para o desalinhamento incluem roletes travados, alimentação descentralizada nos chutes, tambores com desgaste no revestimento, desvios na emenda da correia, estruturas desalinhadas e dispositivos mal posicionados.

Os impactos operacionais são expressivos. O desalinhamento gera desgaste acelerado das bordas da correia, podendo levar a rasgos e danos permanentes, além de ocasionar vazamentos de material, paradas não programadas e aumento dos custos de manutenção. Ainda segundo Correias Mercúrio (2023), esse problema também compromete a produtividade da planta, pois interfere diretamente na disponibilidade e na eficiência dos transportadores.

Os impactos do desalinhamento são diversos e prejudiciais à operação. Entre eles, destacam-se:

- Redução da vida útil da correia: O desgaste desigual causado pelo desalinhamento acelera a deterioração da correia.
- Paradas não programadas: Interrupções frequentes para correções aumentam o tempo de inatividade e os custos operacionais.
- Vazamento de materiais: A perda de material pelas bordas da correia compromete a eficiência do transporte e pode causar danos ambientais.
- Prejuízo à produção: A soma desses fatores resulta em queda na produtividade e aumento dos custos operacionais.

Portanto, fica evidente que a mitigação dos efeitos do desalinhamento contribui diretamente para o aumento da vida útil da correia, melhora a eficiência do sistema de transporte e reduz significativamente a geração de NICs (Números de intervenções corretivas).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Caracterização do material

A caracterização do material particulado é uma etapa fundamental para garantir a confiabilidade e a precisão dos resultados obtidos por meio da simulação pelo Método dos Elementos Discretos (DEM). Isso ocorre porque a eficácia da simulação depende diretamente da correta representação das propriedades físicas e mecânicas do material que está sendo modelado.

A caracterização do material é feita analisando e determinando os seguintes parâmetros.

- **Análise granulométrica**, conforme a norma ABNT NBR 7181 (2025), para definir a distribuição de tamanhos das partículas.
- **Determinação da massa específica real**, segundo a norma ABNT NBR 6508 (2014), essencial para a modelagem da inércia das partículas.
- **Ensaio de cisalhamento**, utilizando célula de cisalhamento tipo Jenike, para obtenção dos ângulos de atrito interno e atrito com a parede.
- **Testes de escoabilidade em caixa de fluxo (Box Flow)**, que auxiliam na validação visual e na calibração dos modelos de simulação, garantindo que os parâmetros numéricos representem fielmente o comportamento real do minério.

O material estudado neste documento é o minério de ferro proveniente do projeto S11D. As características físicas e mecânicas desse minério foram fornecidas pela equipe de laboratório e engenharia, visando uma solução real para o problema de desalinhamento do transportador estudo.

3.2 Método dos elementos discretos - DEM

O Método dos Elementos Discretos (DEM) é uma técnica de simulação numérica amplamente utilizada para estudar o comportamento de materiais particulados e sistemas granulados. Esse método permite a modelagem do movimento individual de partículas, considerando as interações entre elas e também com as superfícies dos equipamentos, sendo altamente eficaz na análise de sistemas descontínuos, como transporte, armazenamento e processamento de sólidos a granel (ARAÚJO et al. 2015.).

Por meio do DEM, é possível prever fenômenos complexos, como fluxo de materiais,

compactação, segregação, desgaste e quebra de partículas, contribuindo significativamente para a otimização de processos industriais. Segundo Cundall e Strack (1979), pioneiros no desenvolvimento da metodologia, o DEM se baseia no acompanhamento do movimento individual das partículas, resolvendo as equações de Newton para cada uma delas, tanto no aspecto translacional quanto rotacional.

3.2.1 Simulação no Bulk Flow Analyst

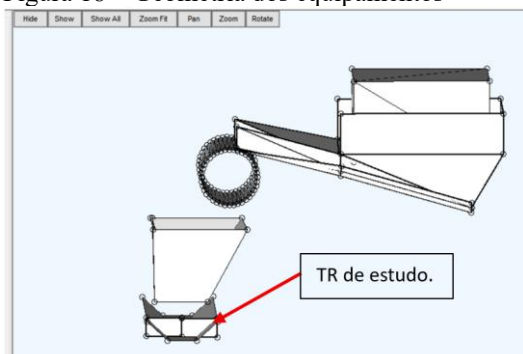
O uso da simulação por meio do Método dos Elementos Discretos (DEM) permite uma análise detalhada do fluxo de materiais sólidos, bem como das interações entre as partículas e com as superfícies dos equipamentos. Essa tecnologia é fundamental para o desenvolvimento, aprimoramento e otimização de sistemas como chutes de transferência, silos, moegas e transportadores de correia, sendo amplamente empregada na indústria de mineração. Com esse objetivo, o software Bulk Flow Analyst™ (BFA), desenvolvido pela Overland Conveyor Company.

O Software possibilita a modelagem do comportamento dinâmico do material durante o processo de transporte, permitindo a visualização do escoamento, detecção de pontos de impacto, identificação de zonas de desgaste e análise de problemas operacionais, como desalinhamentos e bloqueios. Além disso, o software auxilia na previsão dos esforços aplicados sobre os equipamentos, o que é essencial para a redução de custos com manutenção e aumento da vida útil dos ativos (RIBEIRO, Junior, 2024).

3.2.1.1 Simulação

Inicialmente, a geometria dos equipamentos a serem analisados foram desenvolvidas em software CAD (Computer-Aided Design) no AutoCAD. Em seguida, esse modelo foi exportado em formato DXF e importado para o *Bulk Flow Analyst*™ (Figura 18).

Figura 18 – Geometria dos equipamentos



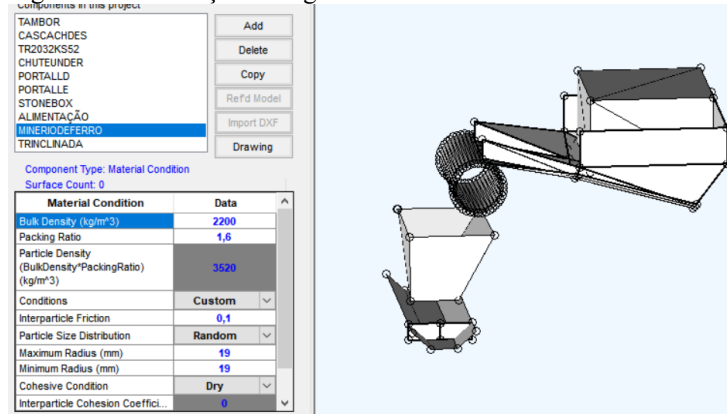
Fonte: Autoria própria (2025).

Após a importação, foram configuradas as superfícies de contato, definindo quais partes da geometria seriam consideradas fixas (Tambor, alimentação, chute e correias) e quais seriam interativas com o fluxo de material.

Em seguida, foram definidos os parâmetros físicos do material a granel (minério de ferro), incluindo:

- Densidade (ρ) = 3520 (kg/m³);
- Fator de empacotamento = 1,6;
- Densidade aparente do material granular (ρ_b) = 2200 (kg/m³);
- Coeficiente de atrito entre as partículas = 0,1;
- Tamanho mínimo e máximo das partículas = 19(mm).

Figura 19 – Definições das geometrias



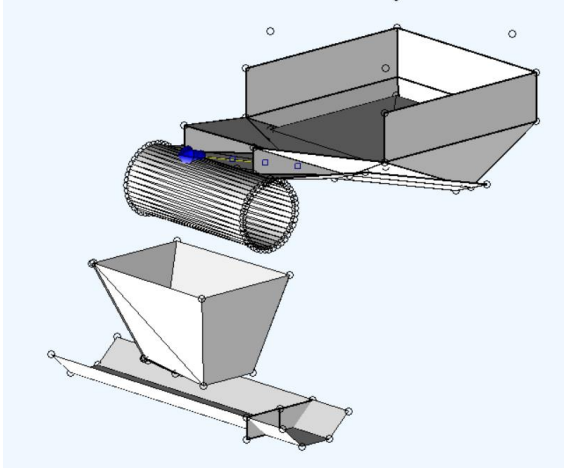
Fonte: Autoria própria (2025).

Vale ressaltar que os dados da caracterização do material foram fornecidos pela equipe do laboratório e pela engenharia da companhia.

Configuração das condições operacionais: nesta etapa foram inseridos os dados operacionais do equipamento, tais como:

- Vazão de alimentação = 600 (t/h);
- Velocidade da correia = 3 (m/s);
- Posição e orientação dos chutes de alimentação;
- Direção e sentido de deslocamento do material (Figura 20).

Figura 20 – Sentido do fluxo do material



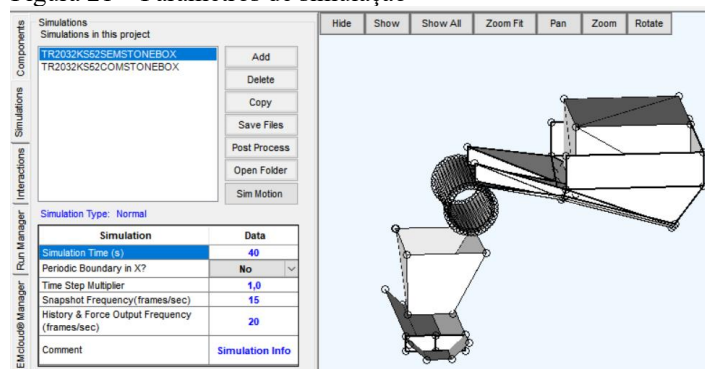
Fonte: Autoria própria (2025).

O software realizou a geração virtual das partículas, obedecendo os tamanhos, densidade e distribuição informados. Foi configurada a quantidade de partículas necessárias para representar fielmente o volume de material transportado.

E por fim, foram definidas as configurações dos parâmetros de simulação (Figura 21):

- Tempo total de simulação = 40 s;
- Frequência de gravação dos dados = 15 quadros/s;
- Taxa de frames para geração dos vídeos = 20 quadros/s.

Figura 21 – Parâmetros de simulação



Fonte: Autoria própria (2025).

Após todas as configurações, a simulação foi executada. Durante este processo, o software calcula, frame a frame, as interações entre as partículas e das partículas com as superfícies do equipamento.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

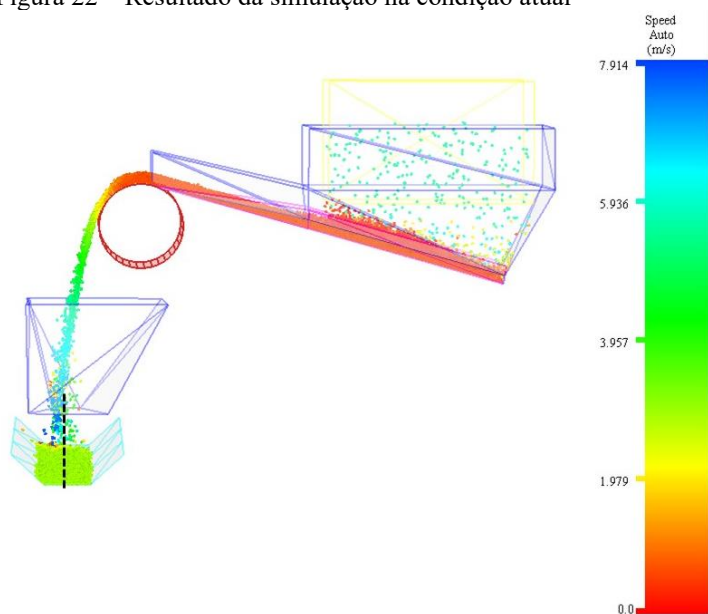
Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos por meio das simulações realizadas no software *Bulk Flow*, considerando tanto a condição atual do sistema quanto a situação com aplicação da melhoria. As simulações permitiram avaliar o comportamento do material durante o transporte, permitindo confirmar a causa do desalinhamento da correia e prever se a solução proposta nesse trabalho será eficiente na solução do problema.

A análise dos resultados possibilita comparar o desempenho entre a configuração atual e a solução proposta, observando aspectos da distribuição do material sobre a correia. Dessa forma, os resultados são discutidos com base nos parâmetros simulados.

4.1 Simulação na condição atual

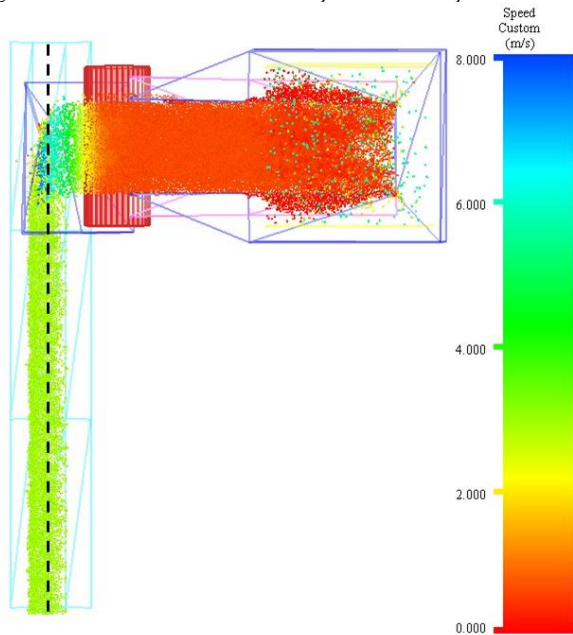
A simulação na condição atual (Figuras 22 e 23) apresentou um comportamento do fluxo de material condizente com aquele observado em campo pela equipe de engenharia e inspeção, o que valida os parâmetros adotados na modelagem e confirma a confiabilidade da simulação por meio do Método dos Elementos Discretos (DEM).

Figura 22 – Resultado da simulação na condição atual



Fonte: Autoria própria (2025).

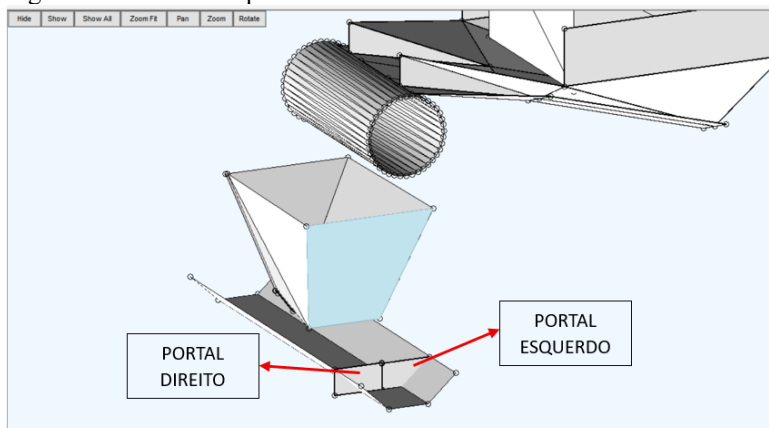
Figura 23 – Resultado da simulação na condição atual – vista superior



Fonte: Autoria própria (2025).

Conforme pode ser observado nas figuras acima, o fluxo de minério de ferro se distribui de forma não uniforme sobre a correia. Para validar essa constatação de forma quantitativa, foi utilizado no software um recurso denominado "portal" (Figura 24), que permite mensurar a quantidade de partículas que atravessa determinada seção do transportador. Por meio desse recurso, é possível quantificar o número de partículas que passa pelos lados esquerdo e direito da correia, comprovando numericamente o desbalanceamento no carregamento.

Figura 24 – Portais esquerdo e direito



Fonte: Autoria própria (2025).

O gráfico apresentado na Figura 25 foi gerado com base nos cálculos realizados por meio das Equações (1) e (2), que correspondem, porcentagem de partículas que atravessa cada lado da correia. Esses valores foram extraídos a partir dos dados obtidos no recurso "portal" da

simulação, que é a mesma ideia do trabalho de (RIBEIRO JUNIOR, 2024).

$$\frac{E}{D+E} \times 100\% \quad (1)$$

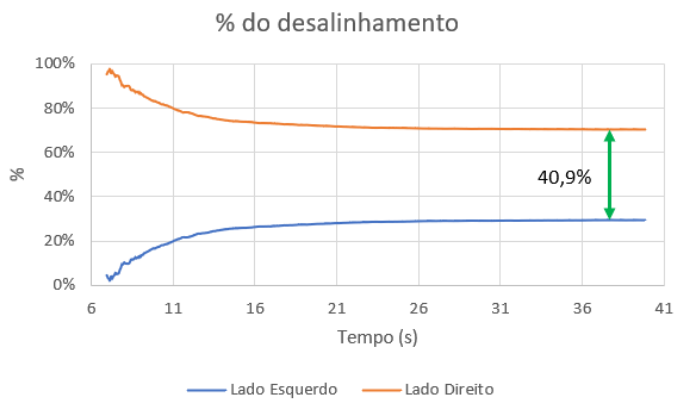
$$\frac{D}{D+E} \times 100\% \quad (2)$$

Onde:

D = Quantidade de partículas que passa no lado direito

E = Quantidade de partículas que passa no lado esquerdo

Figura 25 – Desalinhamento na condição atual



Fonte: Autoria própria (2025).

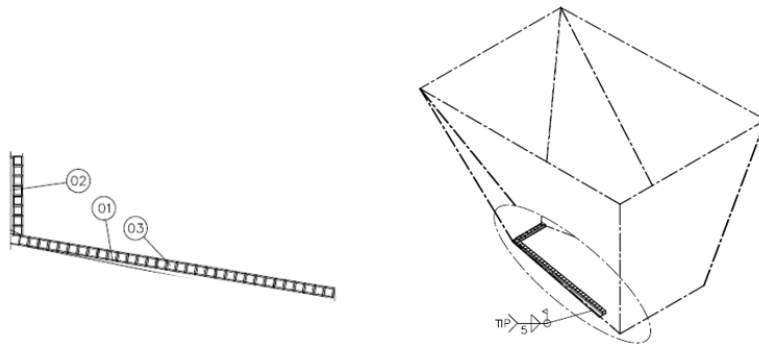
A partir da análise do gráfico, é possível concluir que há uma alimentação descentralizada no chute responsável pela transferência do material para a correia. Segundo Ribeiro (2024), a uniformização da distribuição do material ocorre quando as duas linhas representadas no gráfico, correspondentes aos lados esquerdo e direito da correia se sobrepõem. No entanto, no caso estudado, observou-se uma diferença de 40,9% entre os lados, evidenciando um carregamento assimétrico que contribui diretamente para o desalinhamento da correia conforme mencionado na Seção 2.6.

4.2 Solução proposta

A solução adotada para mitigar o problema de carregamento desbalanceado consistiu na modificação do chute de transferência, por meio da instalação de um stone box (caixa de pedra) na sua parte inferior, construído por chapa e revestido com pastilhas de chock bar, demonstrado na Figura 26. Essa alteração tem como finalidade criar uma região de ponto morto, cuja função

é promover a dissipação de energia do material na queda e, conseqüentemente, favorecer uma distribuição mais uniforme sobre a correia transportadora.

Figura 26 – Stone box

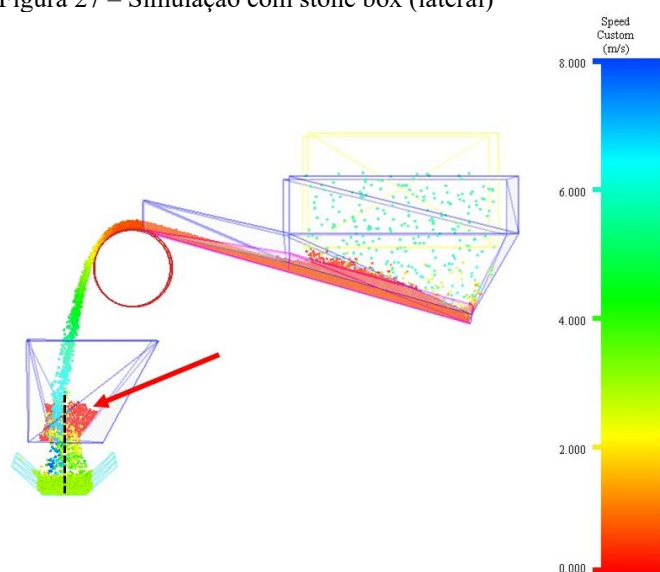


Fonte: Autoria própria (2025).

4.2.1 Simulação com stone box

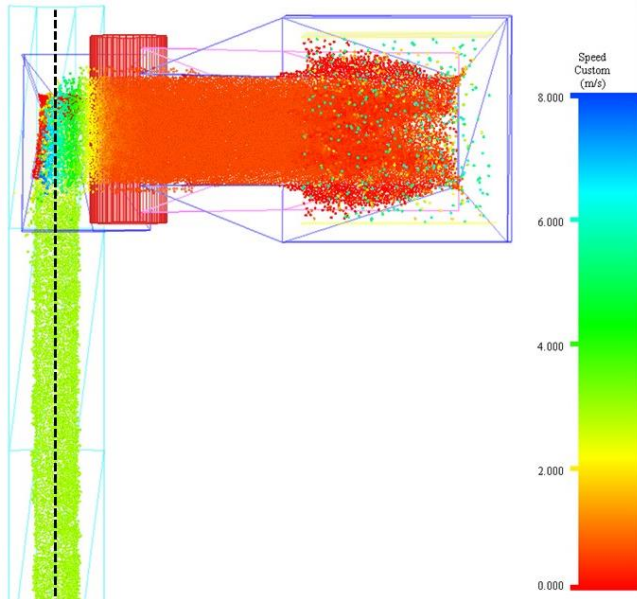
Com a aplicação da caixa de pedra (stone box), observou-se, de forma visual, uma melhora significativa na queda e na distribuição do material sobre a correia (Figura 27), o que comprova a eficiência da solução proposta. Assim como realizado na simulação da condição atual, descrita na seção anterior, será aplicado novamente o recurso do "portal" para quantificar numericamente a distribuição do material e, dessa forma, comparar os resultados antes e depois da implementação da melhoria.

Figura 27 – Simulação com stone box (lateral)



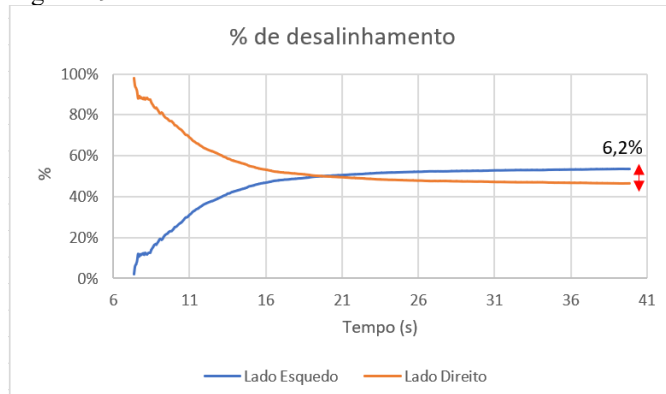
Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 28 – Resultado da simulação com stone box – vista superior



Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 29 – Desalinhamento com stone box



Fonte: Autoria própria (2025).

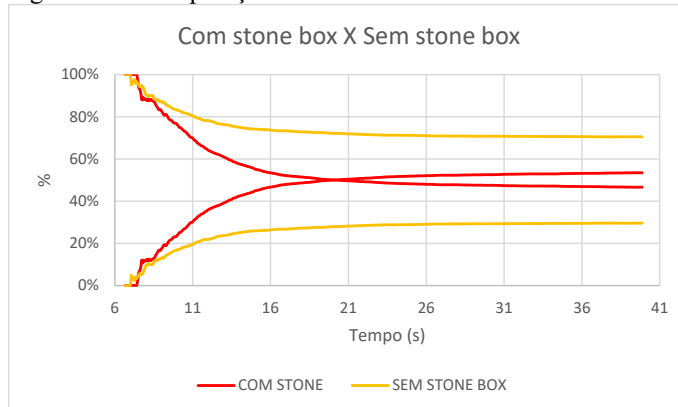
Observando o gráfico da Figura 29, é possível verificar uma significativa redução na descentralização da queda do material. Após a implementação da solução proposta, a diferença entre os lados da correia diminuiu para 6,2%, indicando uma distribuição muito mais equilibrada do fluxo sobre a correia e, conseqüentemente, uma menor tendência ao desalinhamento.

4.3 Ganhos

Com base nos resultados das simulações apresentadas nas Seções 4.1 e 4.2, observou-se um desempenho satisfatório do stone box como solução para o problema de alimentação descentralizada. A aplicação da caixa de pedra resultou em uma redução da assimetria na distribuição do material, passando de 40,9% para 6,2%, o que representa uma melhoria de

aproximadamente 85% em relação à condição anterior. A Figura 30 abaixo apresenta a comparação gráfica entre as duas situações, evidenciando a efetividade da solução adotada.

Figura 30 – Comparação dos resultados



Fonte: Autoria própria (2025).

Vale ressaltar que, quanto mais próximas as linhas estiverem de se sobrepor no gráfico, mais centralizado estará o material sobre a correia, indicando uma condição de alimentação ideal. Diante da satisfação com os resultados obtidos nas simulações, a melhoria proposta foi aceita pela equipe de Processo e Engenharia da companhia, e alguns chutes já receberam essa modificação, conforme ilustrado na Figura 31.

Figura 31 – Instalação do stone box



Fonte: Autoria própria (2025).

Neste trabalho, não serão mensurados os ganhos reais em termos de desempenho operacional, uma vez que, até o encerramento deste estudo, os stone boxes ainda estavam em

fase de instalação nos dez chutes responsáveis pela alimentação da correia. Além disso, seria necessário um período adicional de operação, de alguns meses, para que fosse possível avaliar a performance dos equipamentos e compará-la com a situação apresentada na Seção 2.5.

5 CONCLUSÃO

Através de análises teóricas, simulações pelo Método dos Elementos Discretos (DEM) e validações visuais feito pelo time de confiabilidade em campo, foi possível comprovar que o principal fator para o desalinhamento da correia era a alimentação descentralizada proveniente do chute de transferência.

Com base nessa constatação, foi proposta e testada a instalação de uma caixa de pedra (stone box) no interior do chute, com o objetivo de melhorar a distribuição do material sobre a correia. As simulações realizadas no software Bulk Flow Analyst demonstraram uma melhora expressiva na uniformidade do carregamento, reduzindo a diferença de distribuição de 40,9% para apenas 6,2%. Esse resultado indica uma mitigação significativa da tendência ao desalinhamento, trazendo ganhos diretos para a confiabilidade e disponibilidade do sistema de transporte.

Embora os ganhos operacionais reais ainda estejam em fase de medição, devido à recente implementação da solução, os resultados obtidos até o momento são visualmente satisfatórios. Além disso, a replicabilidade da solução para outras unidades com configurações semelhantes reforça seu potencial de padronização e melhoria contínua no processo.

Dessa forma, este trabalho contribui não apenas para a resolução de um problema técnico específico, mas também para a construção de uma abordagem sistemática baseada em dados e tecnologia, alinhada aos princípios da engenharia de confiabilidade e da manutenção preditiva.

6 REFERÊNCIAS

ARAÚJO, B. S. A. et al. **Simulação DEM do empacotamento de sementes de acerola**. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica, 2015. DOI: 10.5151/chemeng-cobeqic2015-379-33990-261536.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6508**: Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181**: Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2025.

CARVALHO, P. S. L. de; SILVA, M. M. da; ROCIO, M. A. R.; MOSZKOWICZ, J. **Minério de ferro**. In: Insumos Básicos. BNDES Setorial 39, p. 197-234, 2013. Disponível em: <http://www.bndes.gov.br/bibliotecadigital>. Acesso em: 26 mar. 2025.

CEMA (Conveyor Equipment Manufacturers Association). **Transportadores de correia para materiais a granel**. 7. ed. Naples: CEMA, 2014.

CORREIAS MERCÚRIO. **Desalinhamento da correia transportadora em pontos específicos: especialista Correias Mercúrio fala sobre as consequências para a operação**. 2023. Disponível em: <https://www.correiasmercurio.com.br/desalinhamento-da-correia-transportadora-em-pontos-especificos-especialista-correias-mercurio-fala-sobre-as-consequencias-para-a-operacao/>. Acesso em: 21 maio 2025.

CUNDALL, P. A.; STRACK, O. D. L. **A discrete numerical model for granular assemblies**. *Géotechnique*, v. 29, n. 1, p. 47-65, 1979.

ELETROBRÁS; CNI; IEL. **Correias transportadoras: guia básico**. Brasília: IEL/NC, 2009. 177 p. ISBN 978-85-87257-38-3.

GAVI. **Manual de Inspeção e Manutenção de Correias Transportadoras e seus Periféricos**. Vitória, 2011.

REVISTA VALE. S11D – **Novos Caminhos para a Mineração. Futuro empreendimento inaugura nova fase na mineração de ferro no Brasil**, Editora Vale, 2016.

JW ENGENHARIA. **Desalinhamento de correia transportadora: por que acontece?** Disponível em: <https://jweng.com.br/noticias/desalinhamento-correia-transportadora-porque-acontece/>. Acesso em: 6 jun. 2025.

RIBEIRO JUNIOR, José Armando Sousa. **Modernização de um chute de transferência em uma mineradora de bauxita: uma abordagem via simulação DEM**. 2024. 64 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Pará, Campus Universitário de Tucuruí, Faculdade de Engenharia Mecânica, Tucuruí, 2024.

SWINDERMAN, R. Todd; MARTI, Andrew D.; GOLDBECK, Larry J.; MARSHALL, Daniel; STREBEL, Mark G. Foundations™: **Guia Prático para um Controle mais Limpo, Seguro e Produtivo de Pó e Material a Granel**. 4. ed. Martin Engineering, 2009.

TUBOS ABC. **Entenda a importância do minério de ferro**. Disponível em: https://www.tubosabc.com.br/meio-ambiente/minerio-de-ferro/?doing_wp_cron=1740614795.2515230178833007812500. Acesso em: 26 mar. 2025.

VALE. S11D: **Maior projeto de minério de ferro da história da Vale**. 2016. Disponível em: [file:///C:/Users/geova/Downloads/Sala_de_Imprensa_-_Mineracao_-_S11D_maior_projeto_de_min%C3%A9rio_de_ferro_da_hist%C3%B3ria_da_Vale_ID=1718%20\(3\).pdf](file:///C:/Users/geova/Downloads/Sala_de_Imprensa_-_Mineracao_-_S11D_maior_projeto_de_min%C3%A9rio_de_ferro_da_hist%C3%B3ria_da_Vale_ID=1718%20(3).pdf). Acesso em: 26 mar. 2025.

VICENTE, A. **Transportadores de correia**. TTE (Treinamento Técnico Especializado Ltda). Rev. 0, 2023.